Э. И. Расовский

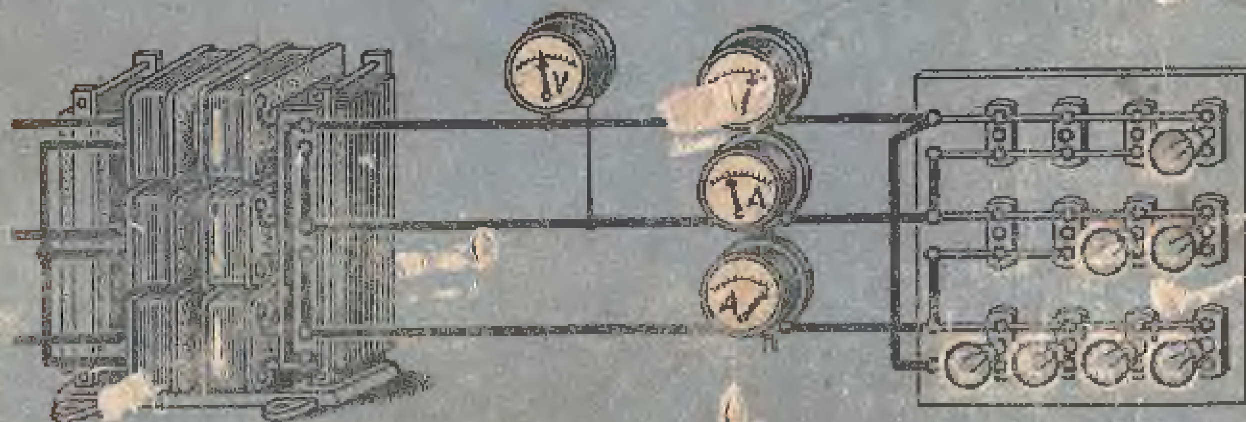
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

в рисунках и чертежах

Часть I

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

издание второе переработанное



Цена 25 р. в папке
по прейскуранту 1952 г.



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

Ленинград 1952 Москва

Э. И. РАСОВСКИЙ

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА В РИСУНКАХ И ЧЕРТЕЖАХ

Часть I

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Издание второе переработанное



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД 1952 МОСКВА

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Преподавание электротехники в средних и высших технических школах часто затрудняется отсутствием пособий, обеспечивающих наглядность обучения. Сложные процессы в электрических цепях, в электрических машинах и аппаратах затруднительно изобразить наглядно на доске. Применение экспериментальных установок, демонстрационных моделей и наглядных учебных пособий способствует уяснению слушателями физической сущности рассматриваемых явлений и лучшему усвоению излагаемого материала.

Длительный опыт преподавания теоретических основ электротехники и курса общей электротехники в Московском институте механизации и электрификации сельского хозяйства имени В. М. Молотова (МИМЭСХ) полностью подтверждает целесообразность использования таких опытов и наглядных пособий.

Советские средние и высшие технические учебные заведения имеют значительное количество современного лабораторного оборудования, высококачественных учебников и учебных пособий по электротехнике. Однако немногие из учебных заведений располагают достаточно оборудованными демонстрационными кабинетами и надлежащими наглядными пособиями.

Настоящее пособие предназначено для широкого круга лиц, изучающих и преподающих электротехнику. В таблицах приведены рисунки и схемы установок и моделей демонстрационного кабинета кафедры основ электротехники МИМЭСХ. Пособие составлено коллективом кафедры (Ш. М. Алукер, И. А. Васильева, М. Д. Каминский, Э. И. Расовский, П. Ф. Скворцов) под редакцией Э. И. Расовского и состоит из двух частей.

Первое издание I части настоящего пособия вышло из печати в 1950 г. и полностью разошлось к моменту выхода в свет II части этого пособия в 1951 г.

В новом издании учтены ценные замечания и пожелания, полученные от читателей.

Значительной переработке подверглись главы первая и третья, и частично главы вторая и пятая. Глава четвертая осталась без существенных изменений по причинам, не зависящим от автора.

Автор приносит глубокую благодарность проф. Е. В. Нитусову, проф. М. Ф. Пояркову, проф. В. Н. Степанову и доценту А. И. Даревскому за ряд весьма ценных указаний.

Особую благодарность автор выражает проф. В. Ю. Ломоносову, взявшему на себя труд по рецензированию обеих частей пособия.

Отзывы и пожелания просим направлять по адресу: Москва, Шлюзовая наб., д. 10. Госэнергоиздат:

Автор

СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН И ЕДИНИЦ ИХ ИЗМЕРЕНИЯ

Величина	Обозначение	Единица измерения	Обозначение русским шрифтом	Обозначение латинским или греческим шрифтом
		I. Общетехнические величины		
Длина	*l*	**метр**[1]	*м*	m
Поверхность	*S*	квадратный метр	*м*²	m²
Объем	*V*	кубический метр	*м*³	m³
Масса	*m*	**килограмм**[1]	*кг*	kg
Время	*t*	**секунда**[1]	*сек*	sec
Скорость	*v*	метр в секунду	*м/сек*	m/sec
Ускорение	*a*	метр на секунду в квадрате	*м/сек*²	m/sec²
Работа; энергия	*A*; *W*	джоуль	*дж*	J
Сила	*F*	ньютон	*н*	N
		или джоуль на метр	*дж/м*	J/m
Мощность	*P*	ватт или	*вт*	W
		джоуль в секунду	*дж/сек*	J/sec
		II. Электрические и магнитные величины		
Электрический заряд; количество электричества	*Q*; *q*	кулон	*к*	C
Объемная плотность заряда	ρ	кулон на кубический метр	*к/м*³	C/m³
Поверхностная плотность заряда	σ	кулон на квадратный метр	*к/м*²	C/m²

[1] Основные единицы абсолютной электромагнитной системы МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер).

Величина	Обозначение	Единица измерения	Обозначение русским шрифтом	Обозначение латинским или греческим шрифтом
Электрический ток	a	**Ампер**[1]	*а*	A(C/sec)
Плотность тока	δ	ампер на квадратный метр	*а/м*^{2}	A/m^2
Напряженность электрического поля	E	вольт на метр	*в/м*	V/m
Электрическое напряжение	U, u	вольт	*в*	V(J/C)
Электродвижущая сила	E, e	вольт	*в*	V
Электрический потенциал	φ	вольт	*в*	V
Электрическое сопротивление	R	ом	*ом*	Ω(V/A)
Электрическая проводимость	g	единица на ом	*1/ом*	1/Ω
Удельная проводимость	γ	единица на ом и на метр	*1/ом·м*	1/Ω·m
Температурный коэффициент электрического сопротивления	α	единица на градус Цельсия	*1/°C*	1/°C
Постоянная времени	τ	секунда	*сек*	sec
Диэлектрическая постоянная	ε_0	фарада на метр	*ф/м*	F/m
Электрическая поляризация (вектор поляризации)	P	кулон на квадратный метр	*к/м*^{2}	C/m^2
Коэффициент поляризации	α	—	—	—
Электрическое смещение	D	кулон на квадратный метр	*к/м*^{2}	C/m^2
Поток электрического смещения	N	кулон	*к*	C
Относительная диэлектрическая проницаемость вещества	ε_r	—	—	—
Диэлектрическая проницаемость вещества	ε	фарада на метр	*ф/м*	F/m
Электрическая емкость	C	фарада	*ф*	F(C/V)

Величина	Обозначение	Единица измерения	Обозначение русским шрифтом	Обозначение латинским или греческим шрифтом
Магнитная индукция	B	вольт секунда на квадратный метр, гаусс	*в·сек/м²* *гс*	V·sec/m² Gs
Магнитный поток	Φ	вольт секунда	*в·сек*	V·sec
Потокосцепление	Ψ	вольт секунда	*в·сек*	V·sec
Полный ток; ампервитки	Θ, Iw	ампер	*а*	A
Магнитная постоянная	μ_0	генри на метр	*гн/м*	H/m
Намагниченность	J	ампер на метр	*а/м*	A/m
Напряженность магнитного поля	H	ампер на метр	*а/м*	A/m
Магнитное напряжение	U_m, Hl	ампер	*а*	A
Магнитный скалярный потенциал	φ_m	ампер	*а*	A
Магнитная восприимчивость	$\varkappa$	—	—	—
Относительная магнитная проницаемость вещества	μ_r	—	—	—
Магнитная проницаемость вещества	μ	генри на метр	*гн/м*	H/m
Магнитная проводимость	g_m	генри	*гн*	H(V·sec/A)
Магнитное сопротивление	R_m	единица на генри	*1/гн*	1/H(A/V·sec)
Коэффициент магнитного рассеяния	σ	—	—	—
Индуктивность	L	генри	*гн*	H
Взаимная индуктивность	M	генри	*гн*	H
Коэффициент магнитной связи	K	—	—	—
Период	T	секунда	*сек*	sec
Частота	f	герц	*гц*	Hz
Угловая частота	ω	единица на секунду	*сек*$^{-1}$	sec^{-1}

Величина	Обозначение	Единица измерения	Обозначение	
			русским шрифтом	латинским или греческим шрифтом
Начальная фаза	ψ	радиан	*рад*	rad
Угол сдвига фаз	φ	радиан	*рад*	rad
Активное сопротивление	R	ом	*ом*	Ω
Индуктивное сопротивление	x_L	ом	*ом*	Ω
Емкостное сопротивление	x_c	ом	*ом*	Ω
Реактивное сопротивление	x	ом	*ом*	Ω
Полное сопротивление	Z	ом	*ом*	Ω
Активная проводимость	g	единица на ом	*1/ом*	1/Ω
Реактивная проводимость	b	единица на ом	*1/ом*	1/Ω
Полная проводимость	Y	единица на ом	*1/ом*	1/Ω
Активная мощность	P_a, P	ватт	*вт*	w
Реактивная мощность	P_r, Q	вольтампер реактивный	*вар*	VAr
Кажущаяся мощность	P_i, S	вольтампер	*ва*	VA
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	—	—	—

ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ

Наименование	Отношение к главной единице	Обозначение		Наименование	Отношение к главной единице	Обозначение	
		русским шрифтом	латинским или греческим шрифтом			русским шрифтом	латинским или греческим шрифтом
Тера	10^{12}	*Т*	T	Деци	10^{-1}	*дц*	dc
Гига	10^{9}	*Г*	G	Санти	10^{-2}	*с*	c
Мега	10^{6}	*мг*	M	Милли	10^{-3}	*м*	m
Кило	10^{3}	*к*	k	Микро	10^{-6}	*мк*	μ
Гекто	10^{2}	*г*	h	Нано	10^{-9}	*н*	n
Дека	10	*дк*	dk	Пико	10^{-12}	*п*	p

Примечание. Единицы, кратные по времени амперсекунде и ваттсекунде, образуются по правилам единиц времени, а именно, ампер час [*ач*, *Ah*], ватт час [*втч*, *Wh*].

СОДЕРЖАНИЕ

Глава вторая. Электрическое поле

Глава третья. Магнитное поле

Таблица 32. Механические силы в магнитном поле (электромагнитные силы)
» 33. Закон электромагнитных сил
» 34. Закон Ампера
» 35. Электромагниты

Глава четвертая. **Переменный ток**

Таблица 1. Получение переменного тока
» 2. Простейший генератор переменного тока
» 3. Векторные и линейные диаграммы
» 4. Действующее и среднее значения переменного тока или напряжения
» 5. Сложение и вычитание переменных токов или напряжений
» 6. Взаимодействие переменных токов
» 7. Ваттметр в цепи переменного тока
» 8. Цепь переменного тока с активным сопротивлением
» 9. Цепь переменного тока с индуктивностью
» 10. Цепь переменного тока с емкостью
» 11. Параллельное соединение индуктивности и емкости
» 12. Электрический колебательный контур
» 13. Последовательное соединение активного и индуктивного сопротивлений
» 14. Последовательное соединение активного и емкостного сопротивлений

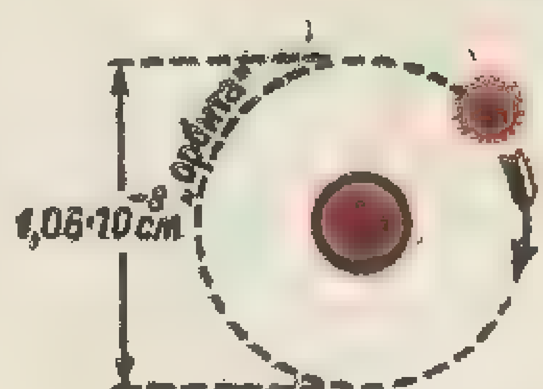
Таблица 15. Последовательное соединение индуктивности и емкости
» 16. Резонанс напряжений
» 17. Последовательная цепь переменного тока
» 18. Параллельное соединение активного сопротивления и индуктивности
» 19. Параллельное соединение активного сопротивления и емкости
» 20. Активная и реактивная слагающие общего напряжения или тока
» 21. Параллельное соединение потребителей переменного тока
» 22. Коэффициент мощности
» 23. Компенсация сдвига фаз
» 24. Параллельные цепи переменного тока
» 25. Резонанс токов
» 26. Последовательно-параллельные цепи переменного тока
» 27. Электродвижущая сила и напряжение генератора переменного тока
» 28. Параллельное соединение генераторов
» 29. Падение и потеря напряжения
» 30. Передача энергии переменным током (демонстрационная установка)
» 31. Цепи с взаимоиндукцией
» 32. Преобразование энергии в трансформаторе
» 33. Цепи, содержащие сталь
» 34. Реактивная катушка

Глава пятая. **Трехфазный ток**

Подписано к печати 8/X-1952 г.
Бумага 60×92. Тираж 10.000 экз.
Т—07021

2-я типография Гослесбумиздата
Ленинград

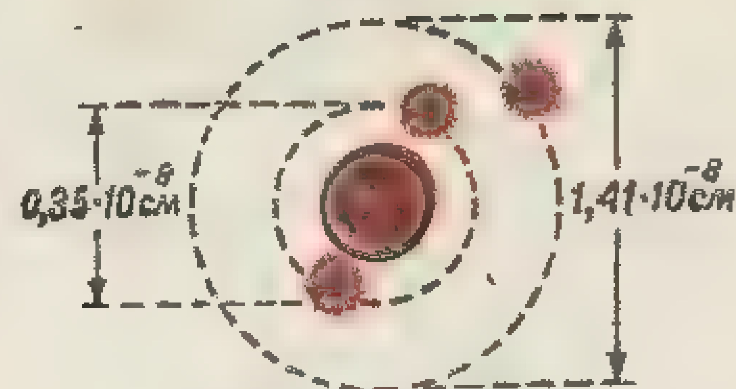
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД



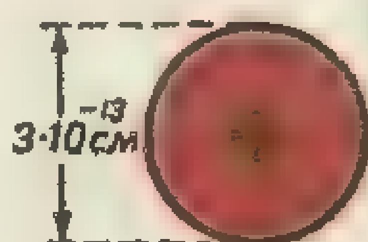
$m=1{,}6733\cdot10^{-24}$ г
масса
Атом водорода (H_1^1)



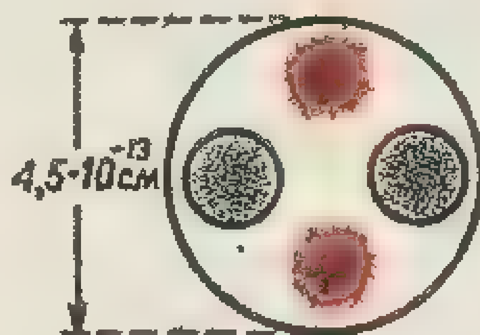
$m=6{,}6458\cdot10^{-24}$ г
масса
Атом гелия (He_2^4)



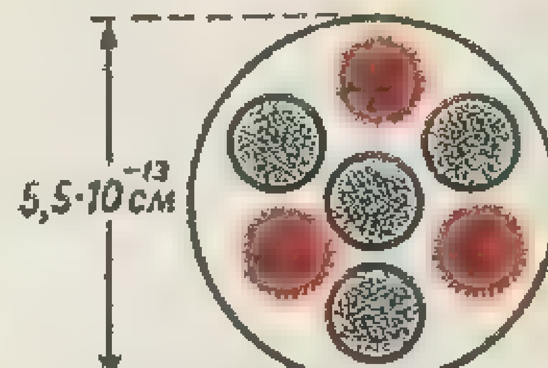
$m=11{,}6\cdot10^{-24}$ г
масса
Атом лития (Li_3^7)



$m=1{,}6724\cdot10^{-24}$ г — масса; $Q=1{,}6\cdot10^{-19}$ к — заряд
Протон
(ядро водорода)



$m=6{,}644\cdot10^{-24}$ г — масса; $Q=3{,}2\cdot10^{-19}$ к — заряд
Ядро атома гелия



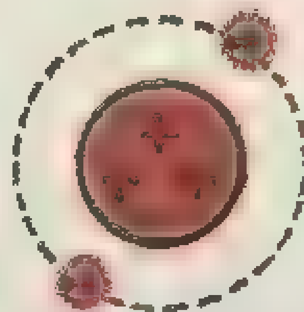
$m=11{,}6\cdot10^{-24}$ г — масса; $Q=4{,}8\cdot10^{-19}$ к — заряд
Ядро атома лития



$m=9{,}1\cdot10^{-28}$ г
$Q=1_э=-1{,}6\cdot10^{-19}$ к
Электрон



$m=1{,}6738\cdot10^{-24}$ г
$Q=0$ к
Нейтрон



$m=11{,}6\cdot10^{-24}$ г; $Q=1{,}6\cdot10^{-19}$ к
Положительный ион лития




Условное обозначение ионов

СХЕМАТИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ АТОМОВ И ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Электрически нейтральные атомы содержат равные количества положительных и отрицательных зарядов

Единица количества электричества — КУЛОН (к) равен заряду $6{,}2\cdot10^{18}$ электронов



ПРИТЯЖЕНИЕ
разноименных зарядов





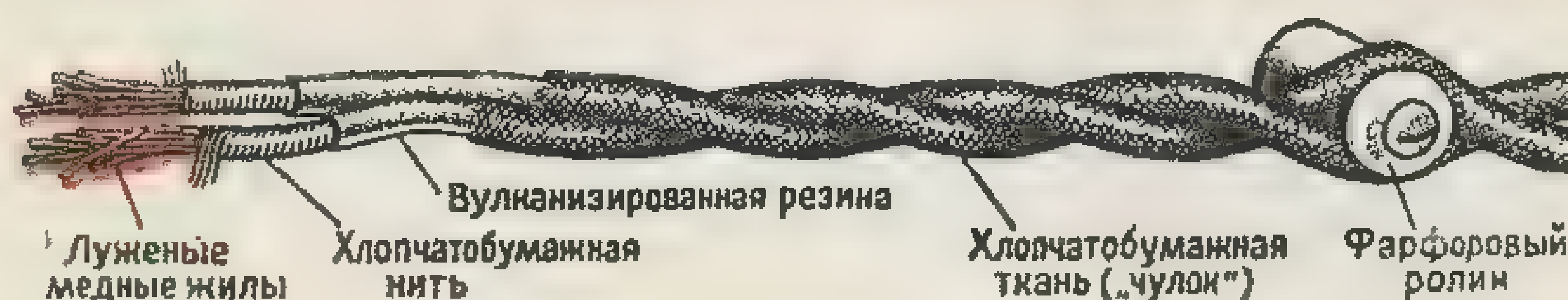
ОТТАЛКИВАНИЕ
одноименных зарядов

СИЛЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ
(ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИЛЫ)

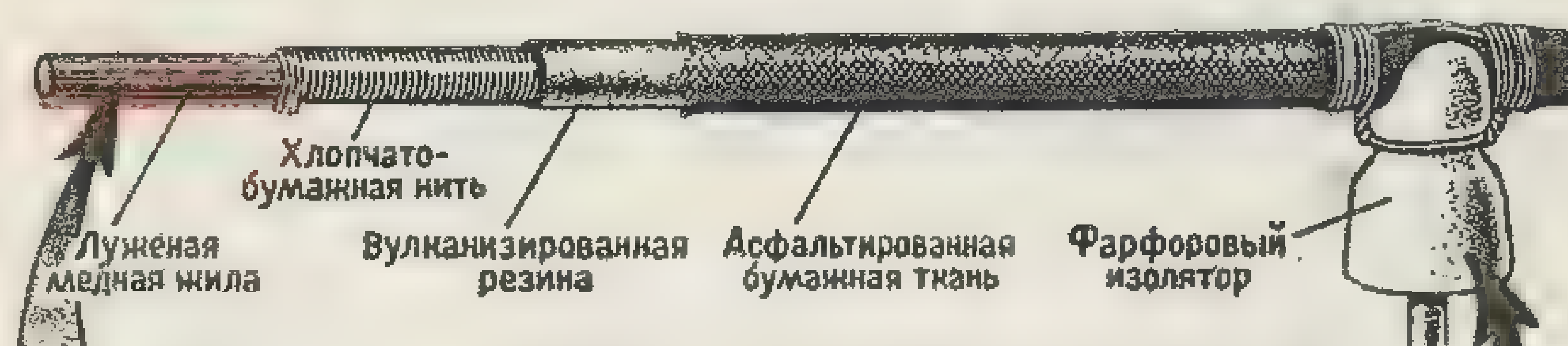
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

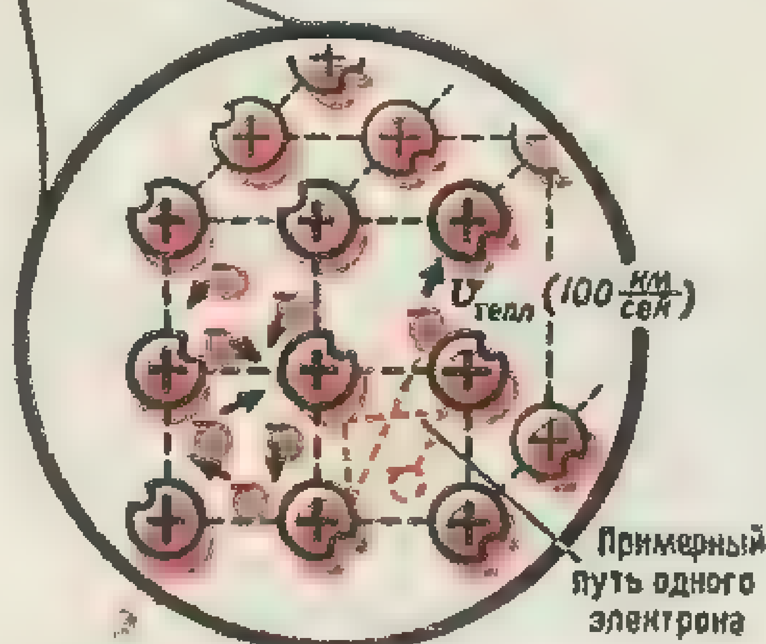
ПРОВОДНИКИ И ИЗОЛЯТОРЫ



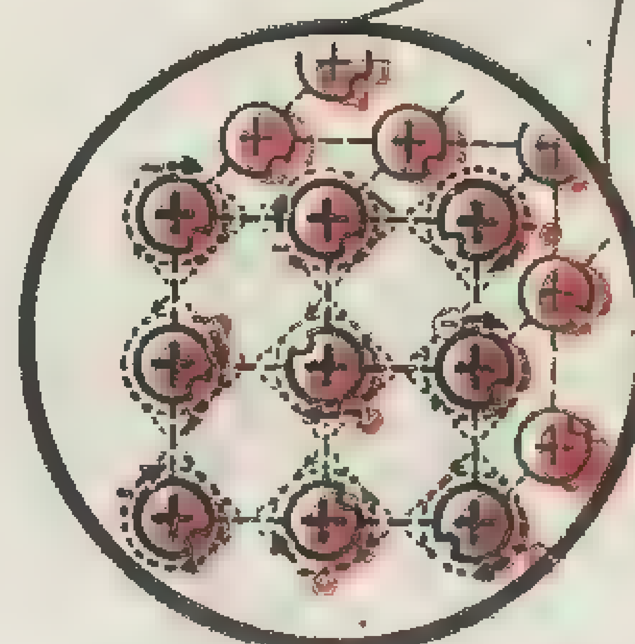
Шнур с резиновой изоляцией двухжильный (*ШР*)



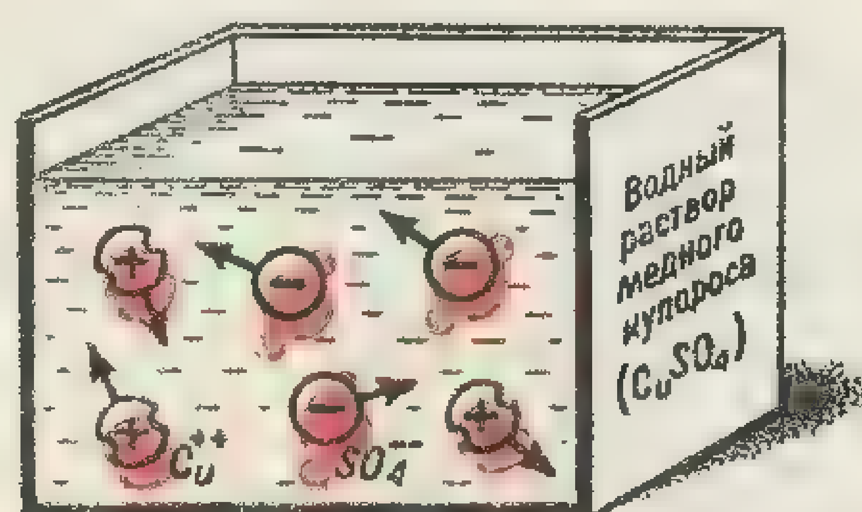
Провод медный с резиновой изоляцией (*ПР*)



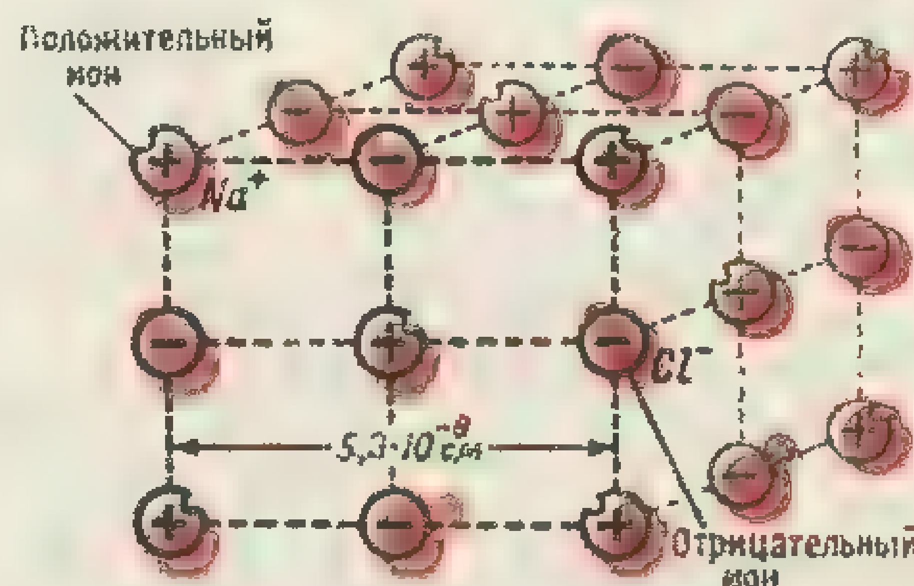
Беспорядочное тепловое движение свободных электронов в межатомном пространстве проводника



Движение связанных электронов в изоляторе



Беспорядочное тепловое движение ионов в электролите

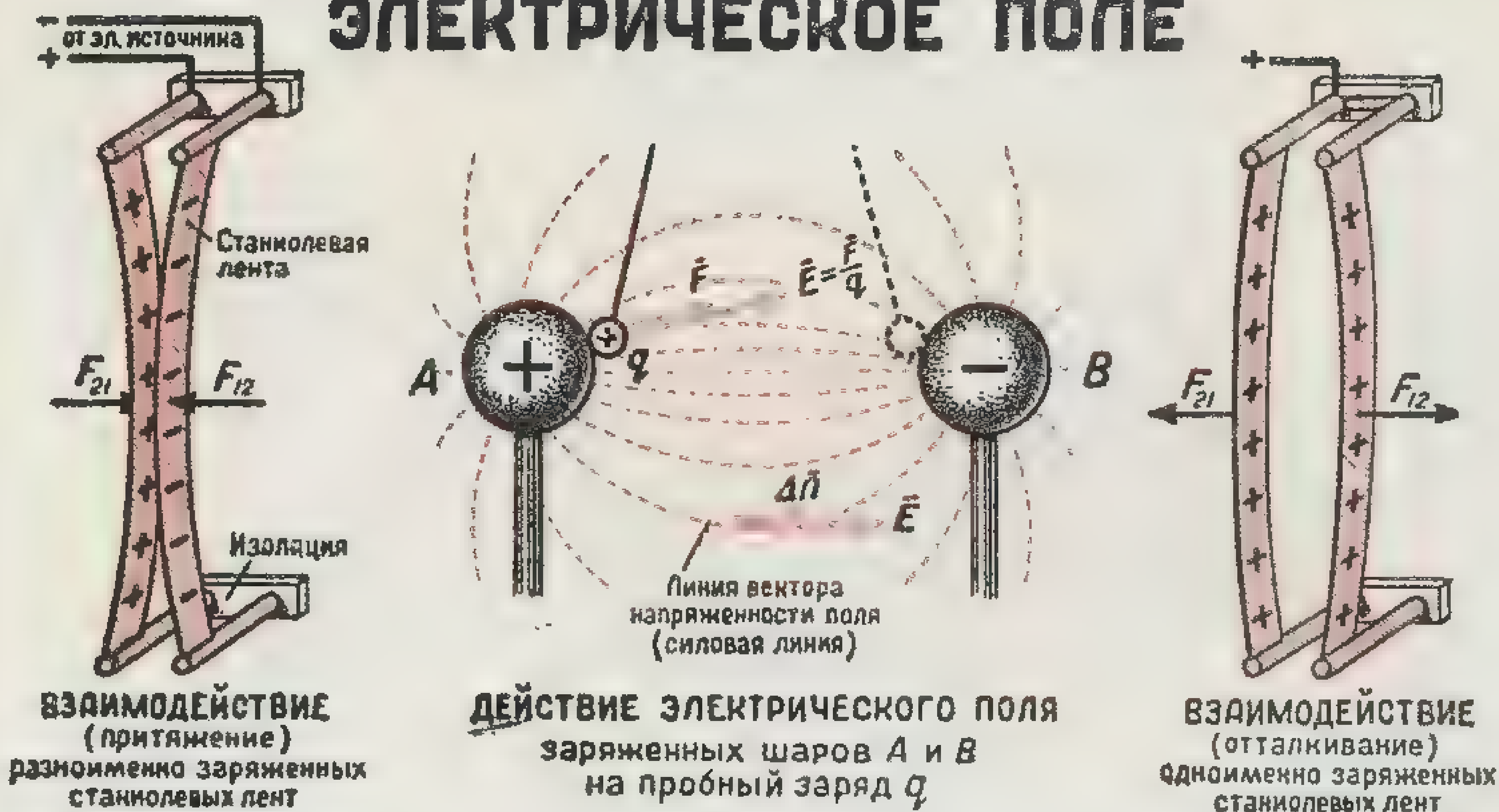


Ионная кристаллическая решетка изолятора (каменная соль — $NaCl$)

Э.И Расовский

Худ. А. Меньшиков

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ (притяжение) разноименно заряженных станиолевых лент

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ заряженных шаров A и B на пробный заряд q

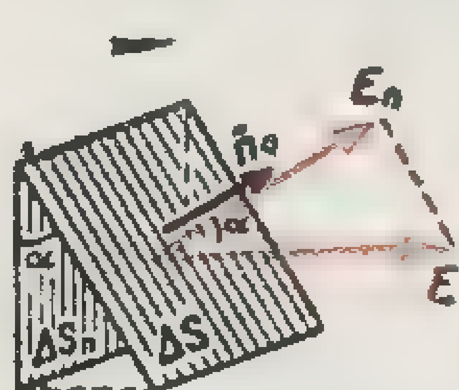
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ (отталкивание) одноименно заряженных станиолевых лент

ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ называется особая форма движения материи в некоторой области пространства, в каждой точке которого проявляются силы, действующие на электрические заряды

$$\bar{E}=\frac{\bar{F}}{q} \quad \frac{в}{м}\left(\frac{дж/м}{к}\right)$$

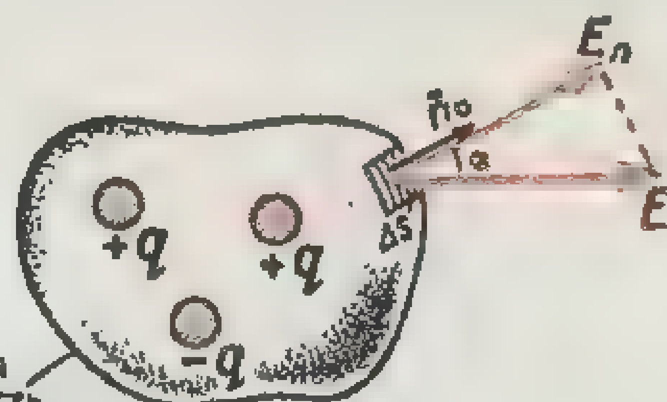
Напряженность электрического поля

НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ есть основная физическая величина, характеризующая интенсивность электрического поля в каждой его точке и представляющая собою силу, отнесенную к единице пробного заряда. **НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ** является направленной величиной (ВЕКТОР), совпадающей с электрической силой



$$\bar{E}\cdot\Delta\bar{S}=E\cdot\Delta S\cdot\cos\alpha=E_n\Delta S=E\cdot\Delta S_n \quad в\cdot м$$

Поток вектора E сквозь площадку ΔS



$$\Sigma_o\bar{E}\Delta\bar{S}=\Sigma_o E_n\Delta S \quad в\cdot м$$

Поток вектора напряженности поля сквозь замкнутую поверхность

$$\varepsilon_o\Sigma_o\bar{E}\cdot\Delta\bar{S}=\Sigma q \quad к$$

Поток вектора напряженности электрического поля сквозь замкнутую поверхность пропорционален заряду, заключенному внутри этой поверхности.

$$\varepsilon_o=\frac{1}{4\pi\cdot 9\cdot 10^9} \quad \frac{к}{в\cdot м}$$

Электрическая постоянная

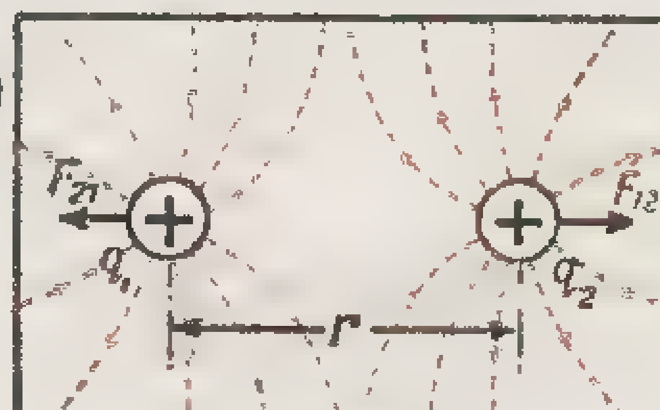
Теорема Остроградского-Гаусса



Притяжение

$$F_{12}=E_1q_2=\frac{q_1\cdot q_2}{\varepsilon_o 4\pi r^2} \quad \frac{дж}{м}(н)$$

Сила взаимодействия двух „точечных" зарядов



Отталкивание

ЗАКОН КУЛОНА

Электростатическое поле — электрическое поле неподвижных зарядов

Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И Э.Д.С.

$U_{AB} = \frac{W_{эл}}{q} = \sum_A^B \frac{\bar F_{эл} \cdot \Delta \bar l}{q} = \sum_A^B \bar E \cdot \Delta \bar l$ в

Электрическое напряжение

A, B, q, $\Delta \bar n$, $\bar E = \frac{\bar F_{эл}}{q}$, $\Delta \bar l$, l, U_{AB}

Движение заряженного шарика в электрическом поле

$\bar E = \frac{\Delta U}{\Delta n} \bar n^{o}$ $\frac{в}{м}$

Напряженность электрического поля

Электрическое напряжение между двумя произвольными точками есть работа, совершаемая ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ силами и отнесенная к единице положительного пробного заряда при его переносе от первой точки до второй

• НАПРЯЖЕНИЕ – РАБОТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛ, ОТНЕСЕННАЯ К ЕДИНИЦЕ КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА •

Напряженность электрического поля измеряется напряжением, отнесенным к единице длины силовой линии

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

220 в, A, B, От первичного двигателя

Электрический генератор

N, S, $\mathcal{E}_{BA}$, $E_{стор}$, v, E, U_{AB}, A, B

Простейший электрический генератор (сравни таблицу №17 главы 3)

U_{AB}, A, B, Cu, Zn, E, H^+, SO_4^{--}, Zn^{++}, $F_{стор}$, q, $F_{эл}$, $E_{стор}$, $\mathcal{E}_{BA}$

Химический элемент ($\mathcal{E} \approx 1{,}1в$)

$\bar E_{стор} = \bar F_{стор}/q$ $\frac{в}{м}$

Сторонняя напряженность

Спай, Медь, Константан, $\mathcal{E}_{BA}$, U_{AB}, A, B

($\mathcal{E}_{100°} = 4мв$; $\mathcal{E}_{500°} = 26мв$)

Термопара

$\mathcal{E}_{BA} = \frac{W_{стор}}{q} = \sum_B^A \frac{\bar F_{стор} \cdot \Delta \bar l}{q} = \sum_B^A \bar E \cdot \Delta \bar l$ в

Электродвижущая сила (э.д.с.)

Электрическое напряжение, развиваемое источником (приемником), или его э.д.с., есть работа, совершаемая СТОРОННИМИ (не электростатическими) силами и отнесенная к единице положительного пробного заряда при его переносе от одного зажима до другого

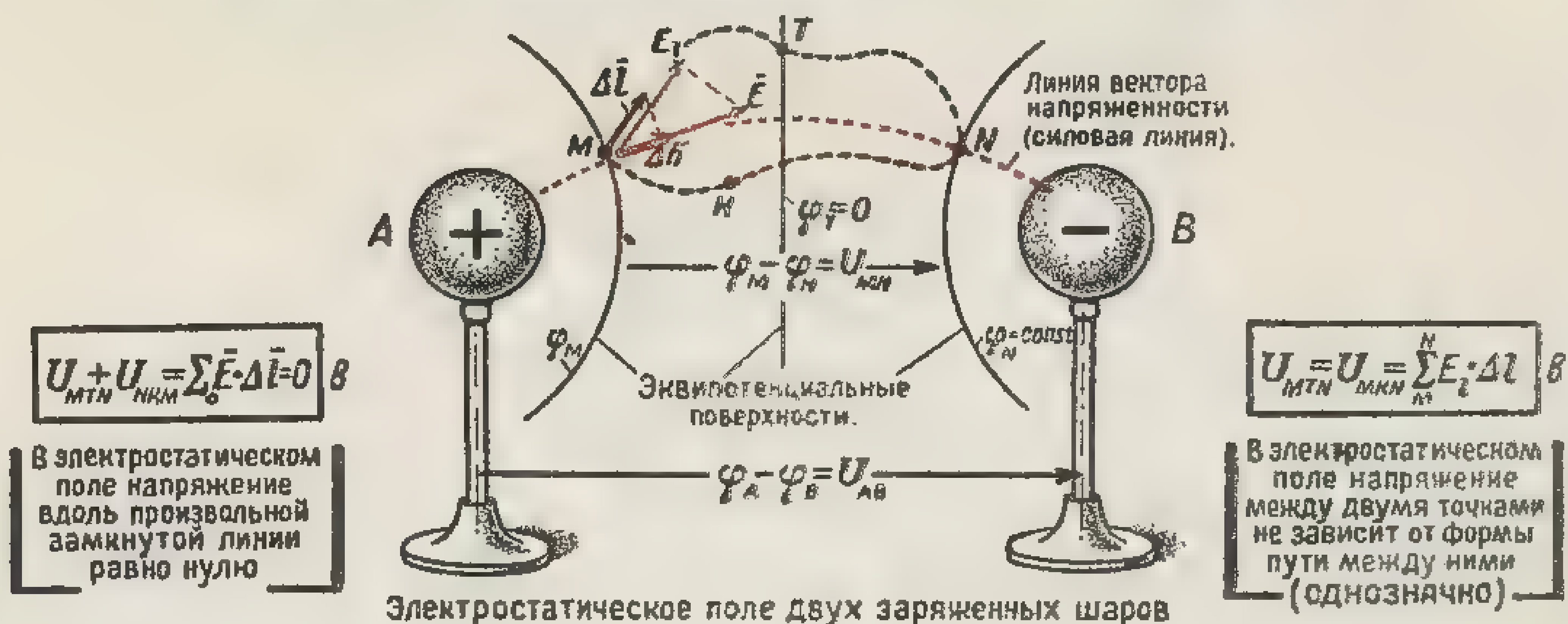
• Э.Д.С. – работа сторонних сил, отнесенная к единице количества электричества •

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА (Э.Д.С.)

Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ



Электростатическое поле двух заряженных шаров

$$\varphi_M=U_{MT}=\sum_M^T E_l\cdot\Delta l$$

Электрический потенциал точки M ($\varphi_T=0$)

Потенциал произвольной точки электростатического поля есть постоянная для данной точки скалярная величина, равная напряжению от этой точки до некоторой исходной, потенциал которой, таким образом, равен нулю

$$\varphi_M-\varphi_N=U_{MN}=\sum_M^N E_l\cdot\Delta l \ \text{в}$$

Разность потенциалов

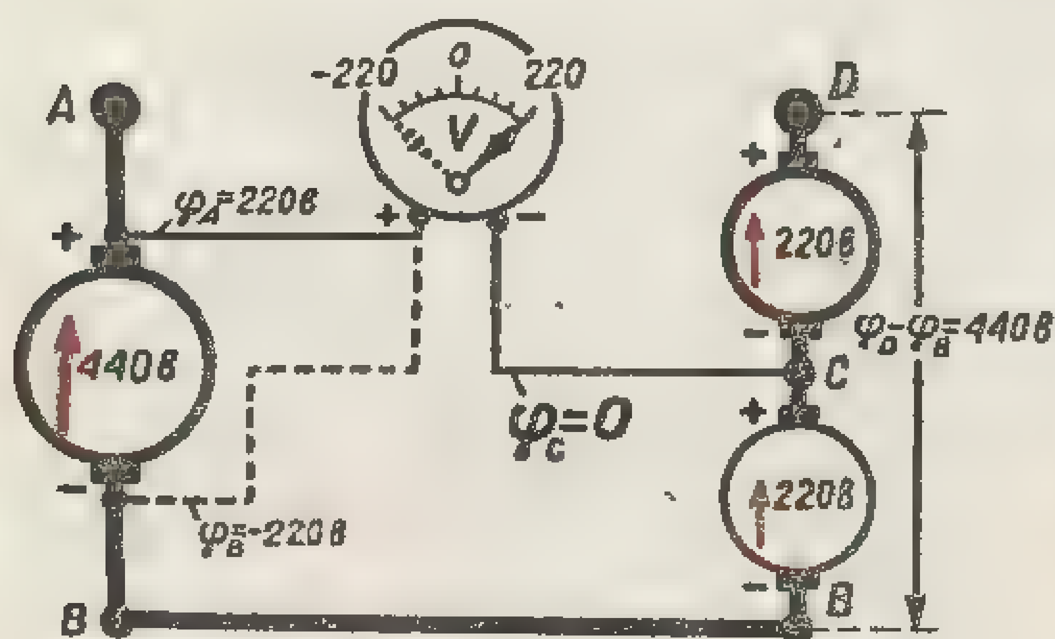
Разность потенциалов двух точек равна ОДНОЗНАЧНОМУ напряжению между ними

$$\bar{E}=-\frac{\Delta\varphi}{\Delta n}\bar{n}^0 \ \frac{\text{в}}{\text{м}}$$

Напряженность поля

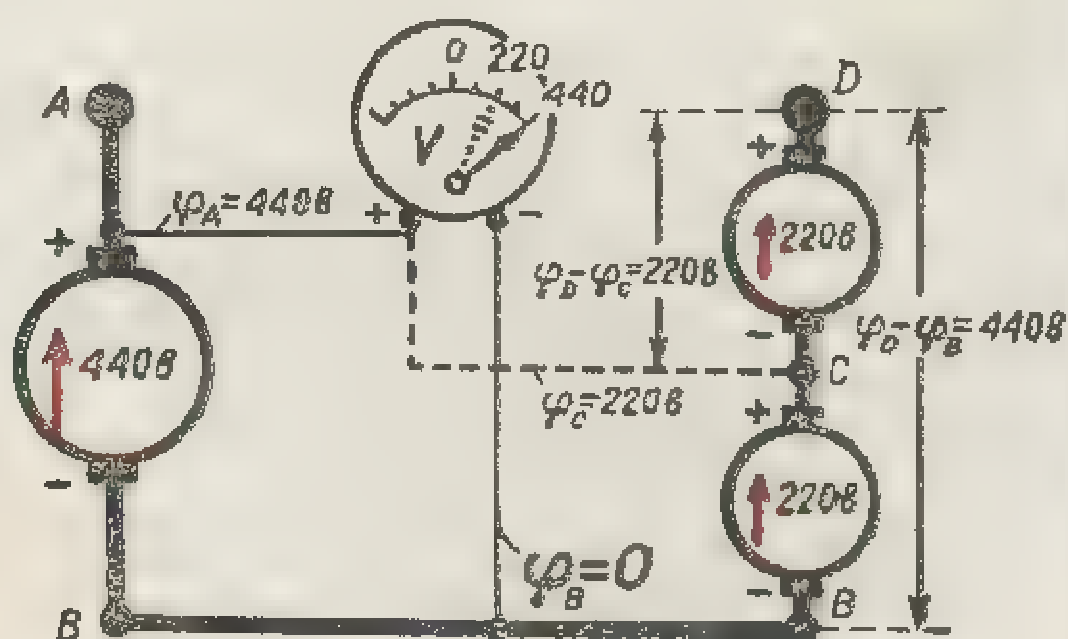
Напряженность электростатического поля равна падению потенциала вдоль единицы длины силовой линии

• Силовые линии нормальны к эквипотенциальным поверхностям •



$\varphi_C=0;\ \varphi_B=U_{BC}=-220\text{в};\ \varphi_D=U_{DC}=220\text{в};$
$\varphi_A=U_{AC}=U_{AB}+U_{BC}=440-220=220\text{в}=\varphi_D;\ \varphi_D-\varphi_B=440\text{в}$

Минус вольтметра включен в исходную точку C, потенциал которой принят равным нулю



$\varphi_B=0;\ \varphi_A=U_{AB}=440\text{в};\ \varphi_C=U_{CB}=220\text{в};\ \varphi_D=U_{DB}=440\text{в}=\varphi_A$
$\varphi_A-\varphi_C=\varphi_D-\varphi_C=220\text{в};\ \varphi_A-\varphi_B=\varphi_D-\varphi_B=440\text{в}$

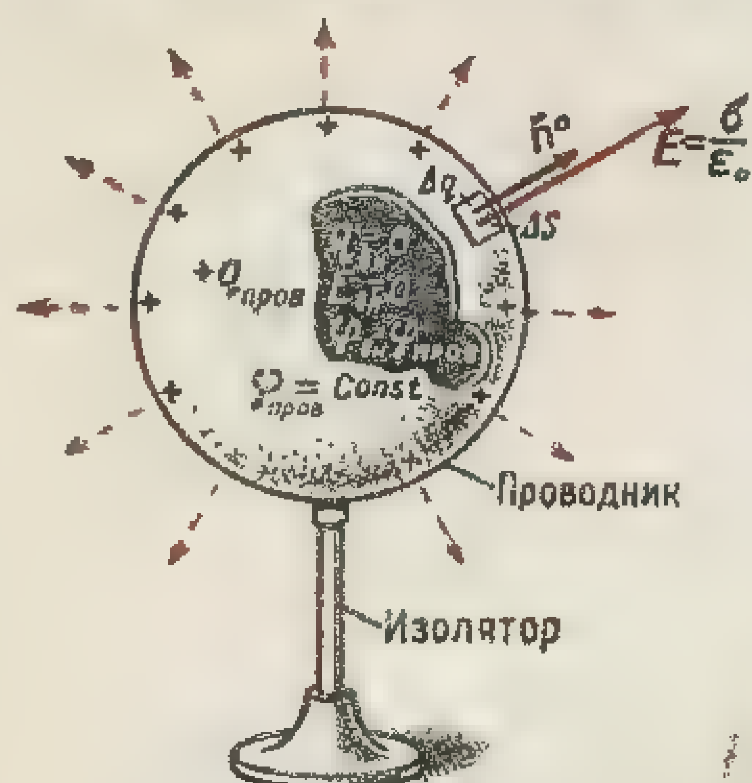
Минус вольтметра включен в исходную точку B, потенциал которой принят равным нулю

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В ЦЕПИ С ТРЕМЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

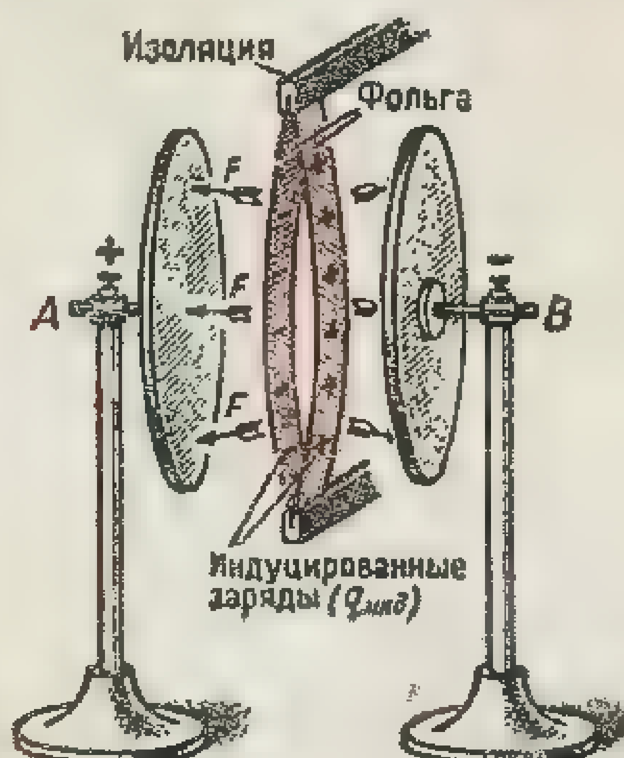
Э И. Расовский

Худ. А Меньшиков

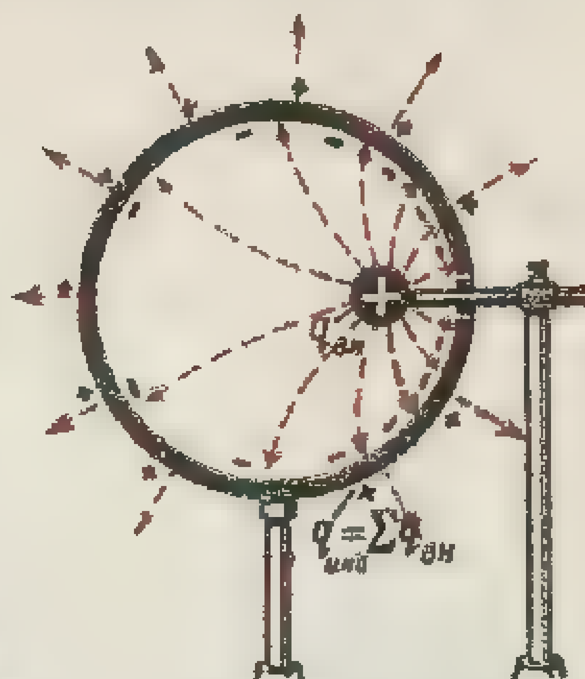
ПРОВОДНИКИ В ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ



Заряженный полый шар (заряды располагаются на поверхности проводника)



Явление электростатической индукции в модели электростатического вольтметра



Проводящая оболочка, охватывающая электрический заряд (иллюстрация к теореме Остроградского-Гаусса)

• Силовые линии нормальны к эквипотенциальной поверхности проводника •

$\sigma = \frac{\Delta q}{\Delta S} = \varepsilon_0 E \quad \frac{к}{м^2}$

Поверхностная плотность электрического заряда

Напряженность электростатического поля у поверхности проводника в вакууме пропорциональна поверхностной плотности электрического заряда

$\bar{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}\bar{n}^\circ \quad \frac{в}{м}$

Напряженность поля у поверхности проводника

$E_x = \frac{Q}{\varepsilon_0 4\pi x^2} = E_a\frac{a^2}{x^2} \quad \frac{в}{м}$

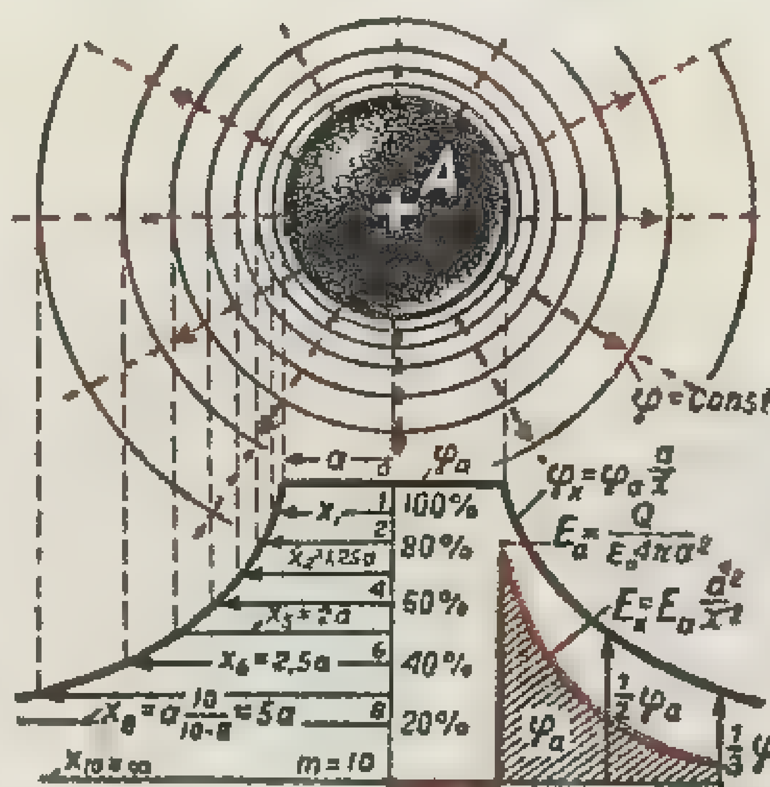
Напряженность поля в произвольной точке

$\Delta\varphi_x = E_{x+\frac{\Delta x}{2}}\cdot\Delta x = \frac{Q}{\varepsilon_0 4\pi}\left(\frac{1}{x}-\frac{1}{x+\Delta x}\right) \; в$

Падение потенциала вдоль отрезка Δx силовой линии

$\varphi_a = \sum_a^\infty \Delta\varphi_x = \frac{Q}{\varepsilon_0 4\pi a} = E_a\cdot a \; в$

Потенциал шара ($\varphi_\infty = 0$)



$\varphi_x = \sum_x^\infty \Delta\varphi_x = E_x\cdot x = \varphi_a\frac{a}{x} \; в$

Потенциал произвольной точки ($\varphi_\infty = 0$)

$\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} = \frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_{n+1}} = \frac{1}{ma} = Const$

$a : x_1 : x_2 \ldots = 1 : \frac{m}{m-1} : \frac{m}{m-2} \ldots$

Отношение радиусов эквипотенциальных поверхностей (сфер) с одинаковой разностью потенциалов: $\Delta\varphi = \frac{1}{m}\varphi_a$

$x = a\frac{m}{m-n}$

Радиус $n^{й}$ эквипотенциальной поверхности (m — общее число эквипотенциальных промежутков)

Поле уединенного заряженного шара

$E_x = \frac{Q}{\varepsilon_0 4\pi x^2} = E_a\frac{a^2}{x^2} = \frac{U_{AB}}{d}\frac{ab}{x^2} \quad \frac{в}{м}$

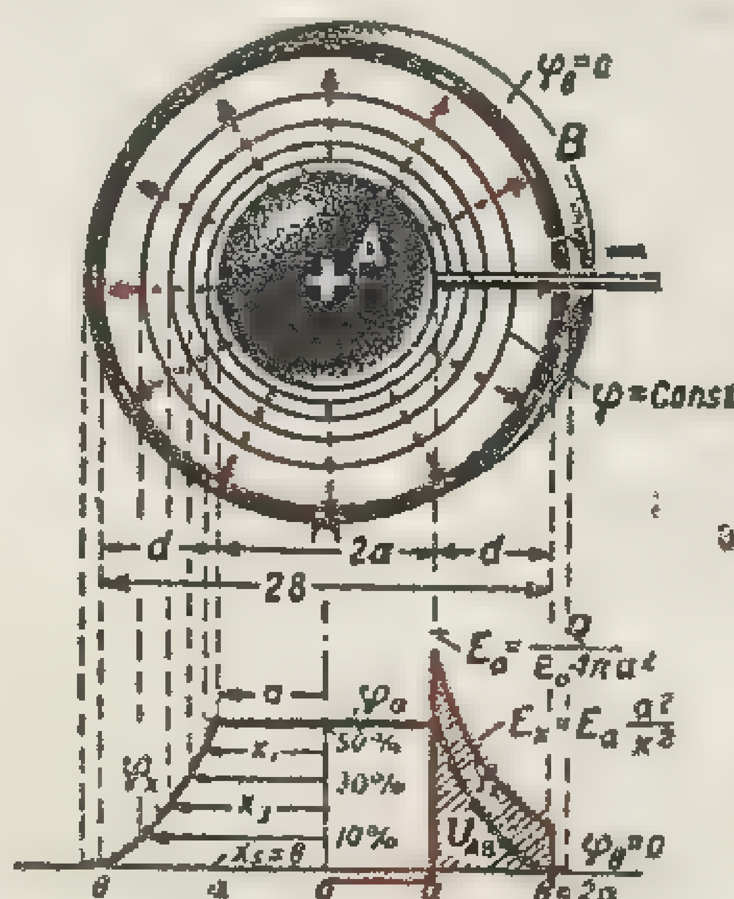
Напряженность поля

$\Delta\varphi_x = \Delta x\cdot E_{x+\frac{\Delta x}{2}} = \frac{Q}{\varepsilon_0 4\pi}\left(\frac{1}{x}-\frac{1}{x+\Delta x}\right) \; в$

Падение потенциала вдоль отрезка ΔX

$\varphi_a = U_{AB} = \frac{Q}{\varepsilon_0 4\pi}\left(\frac{1}{a}-\frac{1}{b}\right) = E_a a\cdot\frac{d}{b} \; в$

Потенциал внутренней сферы ($\varphi_b = 0$)



$\varphi_x = E_x\cdot x - E_b\cdot b = \frac{U_{AB}}{d}\left(\frac{ab}{x} - a\right) \; в$

Потенциал произвольной точки ($\varphi_b = 0$)

$\frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_2} = \frac{1}{x_n} - \frac{1}{x_{n+1}} = \frac{1}{ma}\cdot\frac{d}{b} = Const$

$a : x_1 : x_2 \ldots = 1 : \frac{m}{m-d/b} : \frac{m}{m-2d/b} \ldots$

Отношение радиусов эквипотенциальных поверхностей (сфер)

$x = a\frac{m}{m-n\,d/b}$

Радиус $n^{й}$ эквипотенциальной поверхности

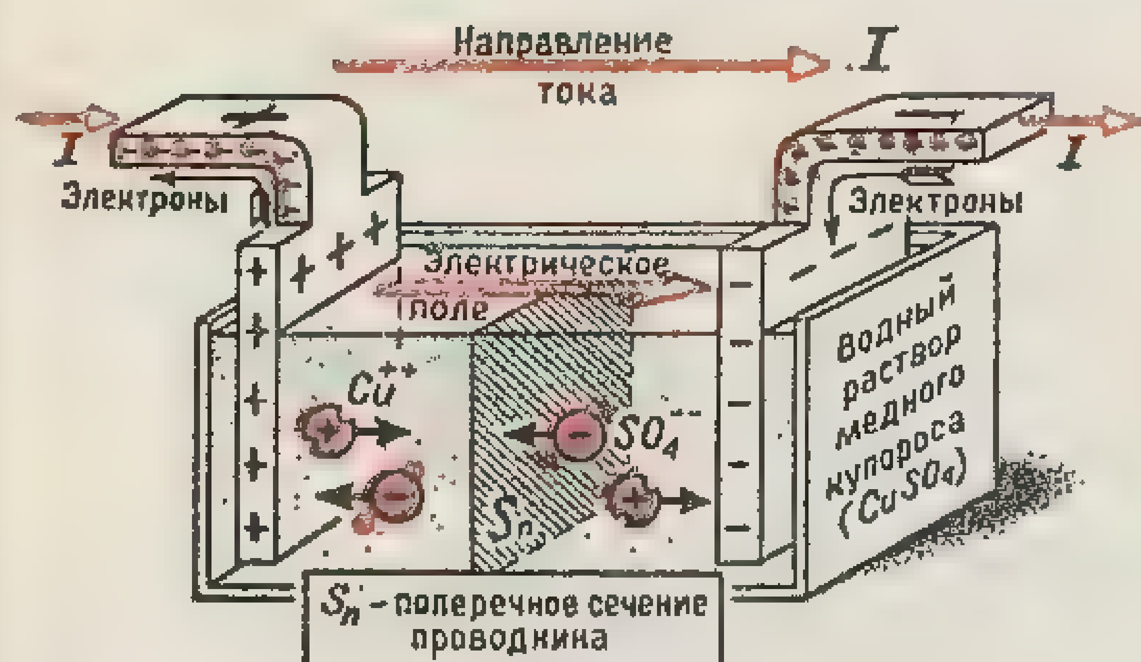
Сферическое поле

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПОЛЯ, ПОЛУЧАЕМЫЕ ПРИ ПОМОЩИ ПРОВОДНИКОВ ЗАДАННОЙ ФОРМЫ

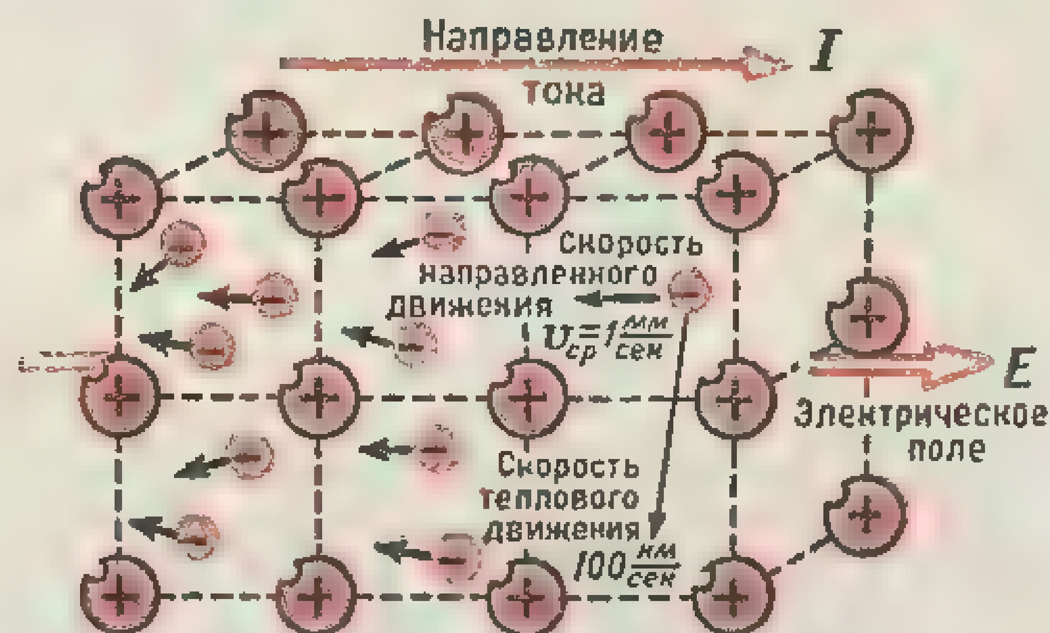
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньщиков

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

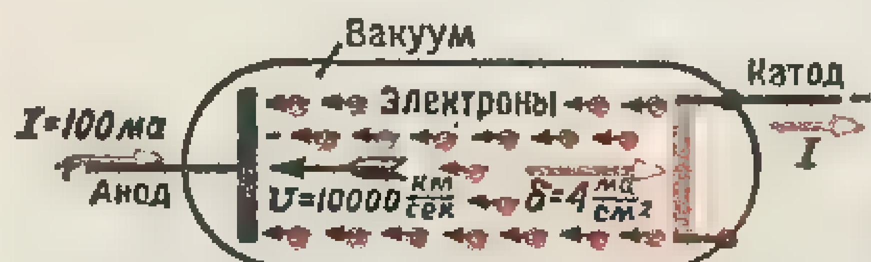


Упорядоченное движение ионов в электролите

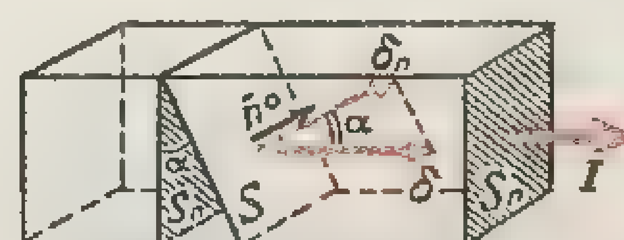


Упорядоченное движение свободных электронов в твердом проводнике со средней скоростью v

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК — направленное движение электрических зарядов



$$\bar{\delta}=\bar{v}_{cp}\rho \quad \text{или} \quad \delta=\frac{Q}{S_n t} \quad \frac{a}{м^2}\left(\frac{к}{сек\cdot м^2}\right)$$



$I=\bar{\delta}\bar{S}=\delta S\cos\alpha=\delta_n S=\delta S_n$ a

ПЛОТНОСТЬ ТОКА характеризует среднюю скорость направленного движения электрических зарядов в однородном проводнике и измеряется количеством электричества, протекающим через единицу поперечного сечения в единицу времени.

$\rho=\frac{Q}{S_n l}$ — объемная плотность движущегося заряда

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК (величина тока) – поток вектора плотности тока

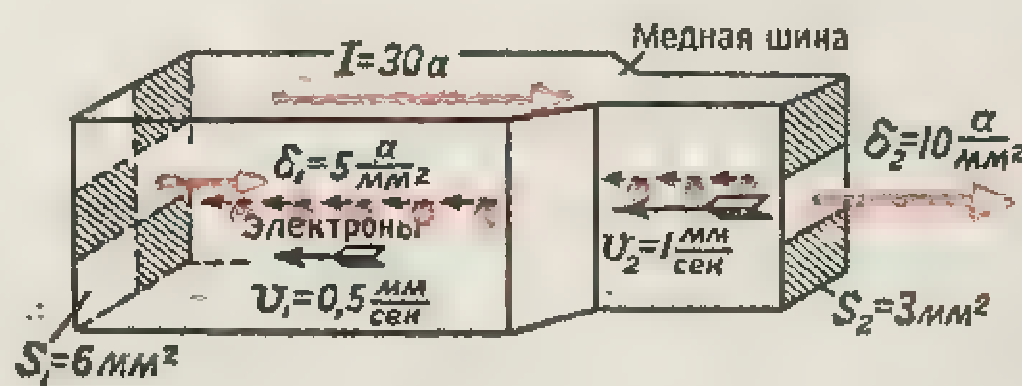
$$I=\frac{Q}{t} \quad a$$

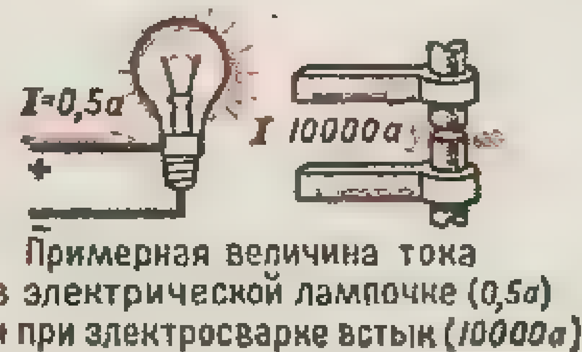
Величина электрического тока („сила тока")

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК в проводнике измеряется количеством электричества, протекающим через его поперечное сечение в единицу времени.

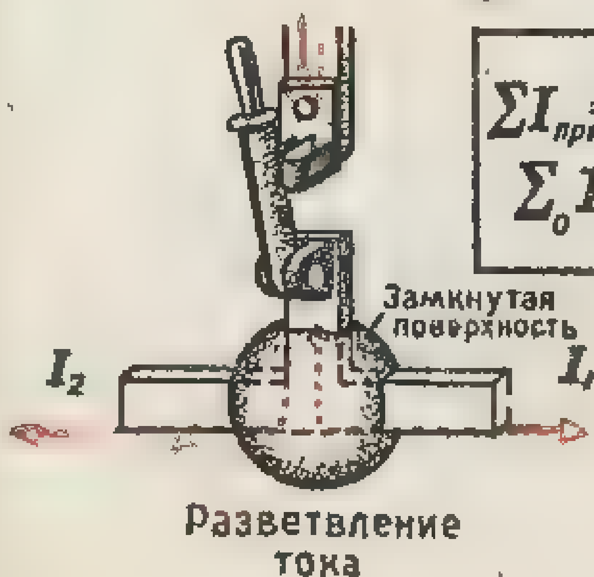
$$\delta=\frac{I}{S_n} \quad \frac{a}{м^2}$$

ПЛОТНОСТЬ ТОКА измеряется током, отнесенным к единице поперечного сечения





Примерная величина тока в электрической лампочке (0,5a) и при электросварке встык (10000a)



Разветвление тока

$$\Sigma I_{прит}=\Sigma I_{ут} \quad a$$
$$\Sigma_0 I=0$$

Сумма токов, притекающих к точке разветвления, равна сумме токов, утекающих из этой точки.

Алгебраическая сумма токов сквозь замкнутую поверхность равна нулю

ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА

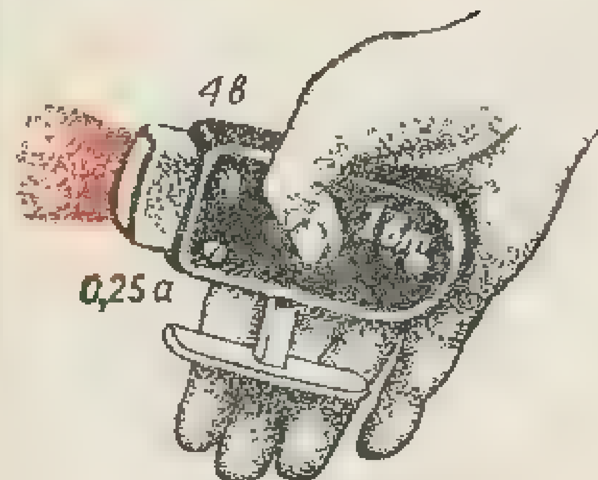


Гидравлическая аналогия

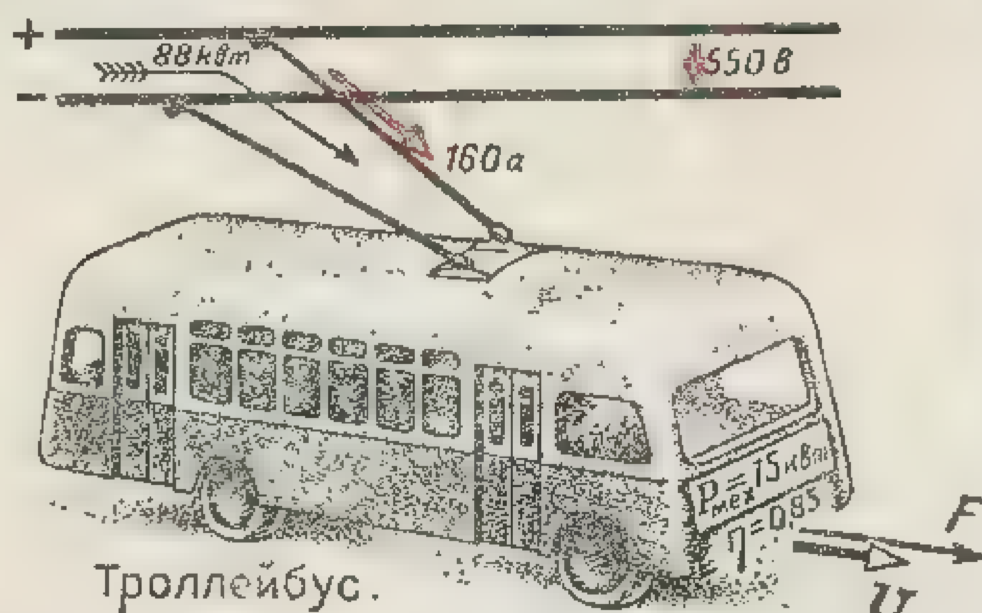
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

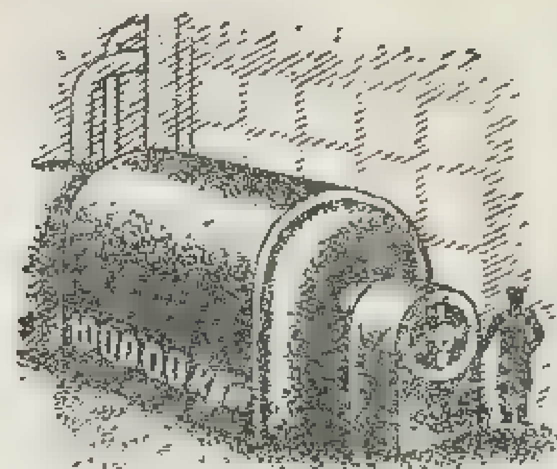
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МОЩНОСТЬ



Ручной фонарь.



Троллейбус.


Генератор большой мощности.

$P = \frac{W_{эл}}{t} = UI$ вт

Электрическая мощность.

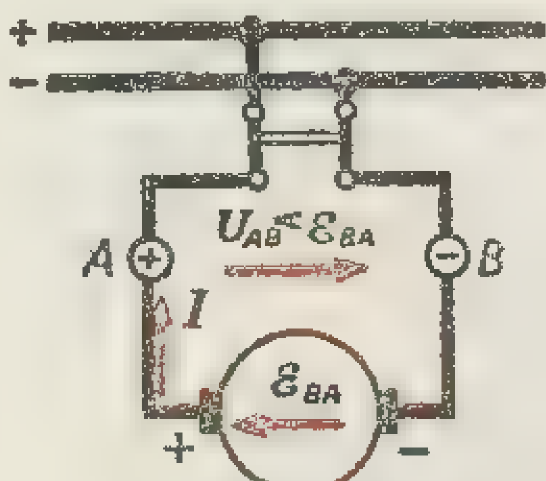
Электрическая мощность (секундный расход электрической энергии) равна произведению напряжения на ток.

$W = UIt$ дж (вт сек)

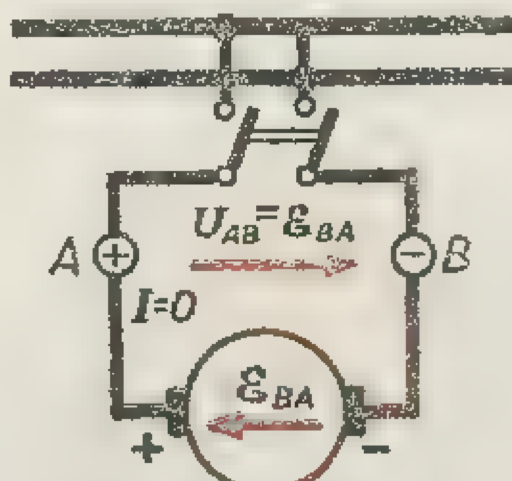
Электрическая энергия

$\frac{P}{V} = \bar{E}\bar{\delta} = E \cdot \delta_E = E_\delta \cdot \delta$ $\frac{вт}{м^3}$

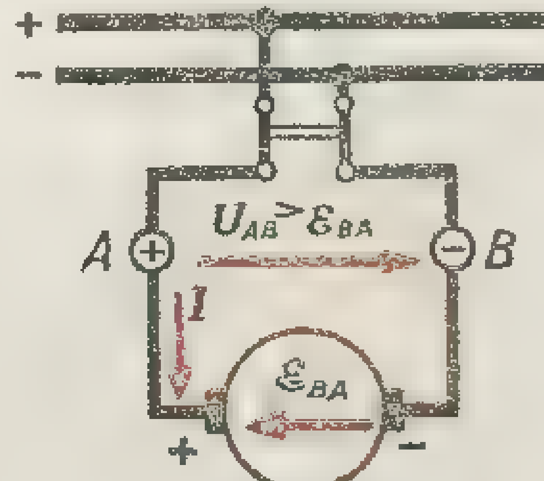
Мощность, отдаваемая электрическим полем в единице объема



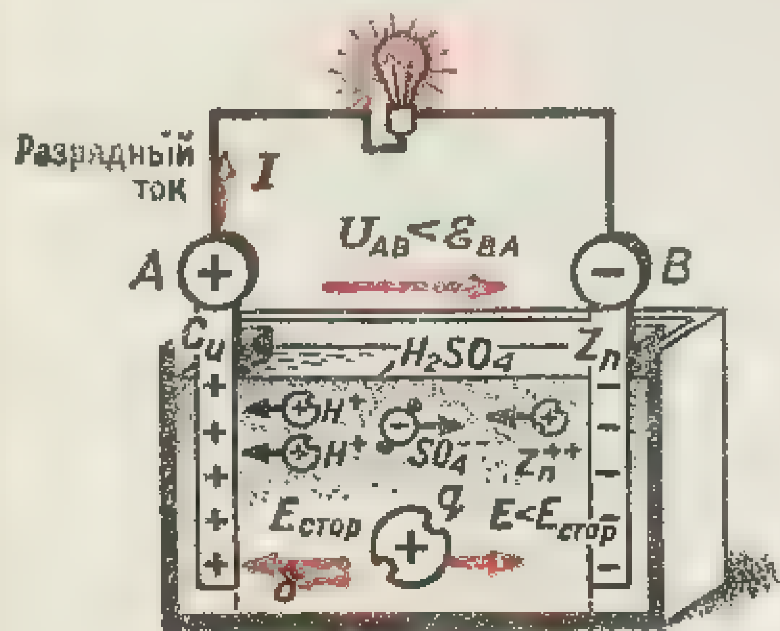
Электрический генератор
—ИСТОЧНИК
электрической энергии, „источник" тока ($\mathcal{E}I > 0$)



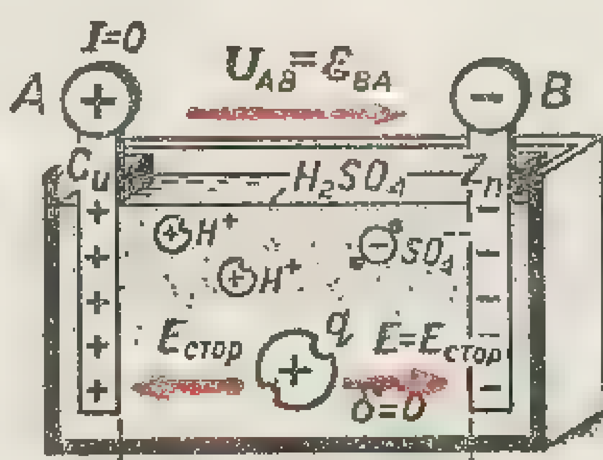
ХОЛОСТОЙ ХОД
генератора
($\mathcal{E}I = 0$)



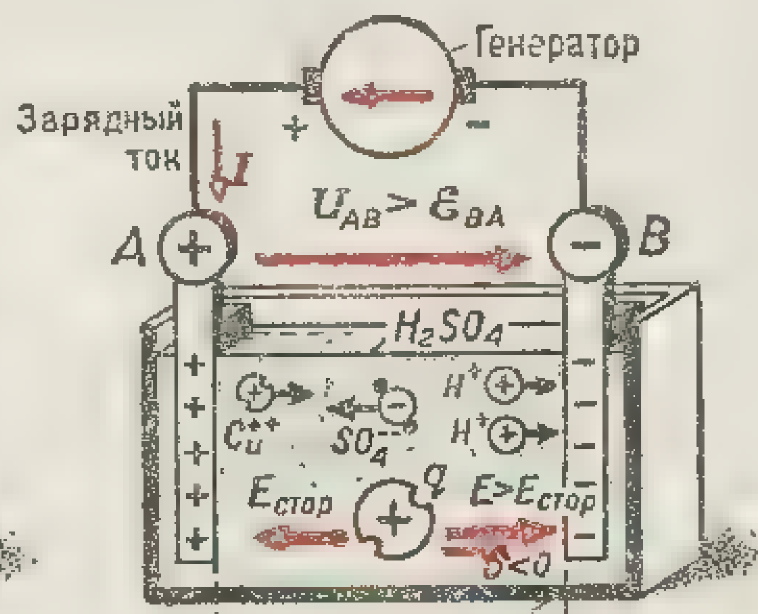
Электрический двигатель
—ПРИЕМНИК
электрической энергии, „потребитель" тока ($\mathcal{E}I < 0$)



Химический элемент
—ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ
($\bar{E}_{стор} \cdot \bar{\delta} > 0$; $\mathcal{E}I > 0$)



ХОЛОСТОЙ ХОД
($\bar{E}_{стор} \cdot \bar{\delta} = 0$; $\mathcal{E}I = 0$)



Химический элемент
—ПРИЕМНИК ЭНЕРГИИ
($\bar{E}_{стор} \cdot \bar{\delta} < 0$; $\mathcal{E}I < 0$)

$P_{и(пр)} = \frac{W_{стор}}{t} = \mathcal{E}I$ вт

Мощность, преобразуемая источником (приемником)

Мощность, преобразуемая электрическим источником или приемником равна произведению его э.д.с. на ток

$\eta = P_{пол} / P_{затр}$

Коэффициент полезного действия

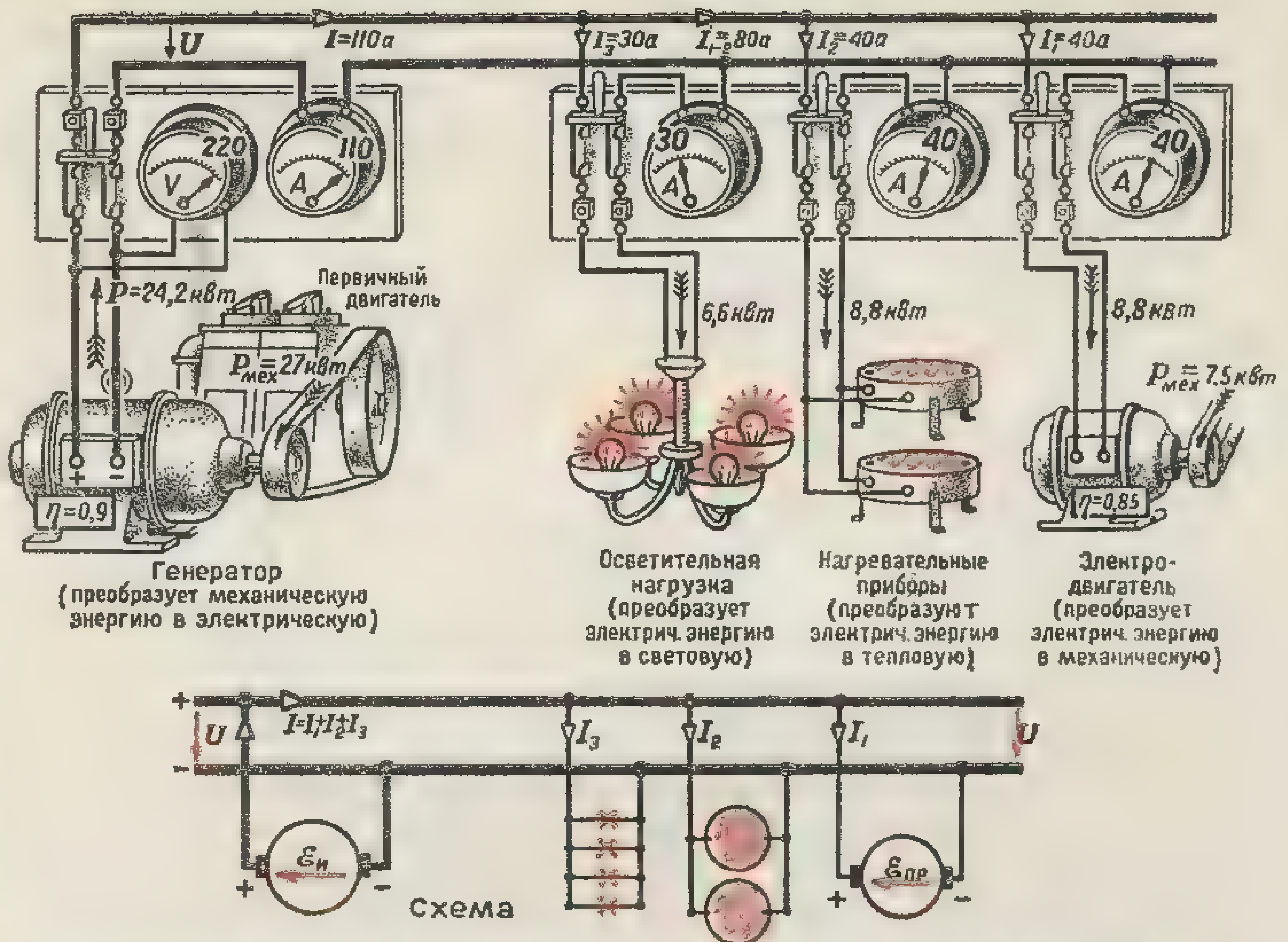
$\frac{P_и}{V} = \bar{E}_{стор} \cdot \bar{\delta} = E_{стор} \cdot \delta_E$ $\frac{вт}{м^3}$

Мощность, развиваемая сторонними силами в единице объема

З.И Расовский

Худ. А.Мельников

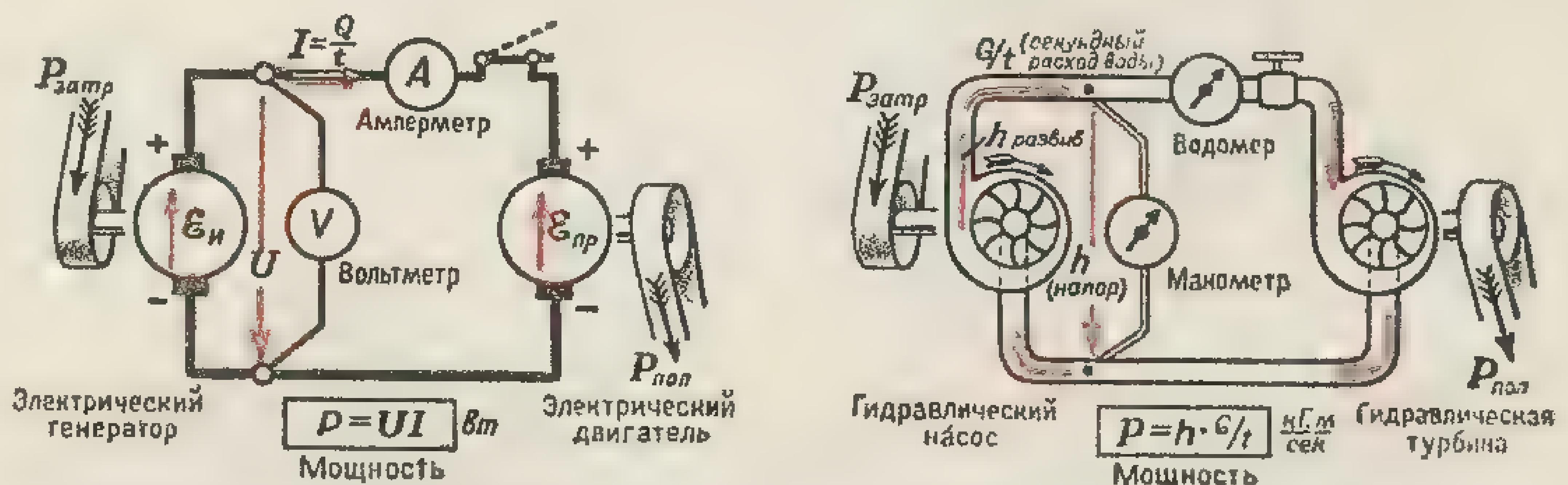
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ



ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

$P=P_{мех}/\eta$ вт	$I=P/U$ а	$P=P_1+P_2+\dots=\Sigma P$ вт	$I=I_1+I_2+\dots=\Sigma I=\frac{P}{U}$ а
Мощность, потребляемая двигателем из сети	Ток, потребляемый двигателем	Общая мощность потребителя	Общий ток нагрузки (ток генератора)

ПОДСЧЕТ НАГРУЗКИ

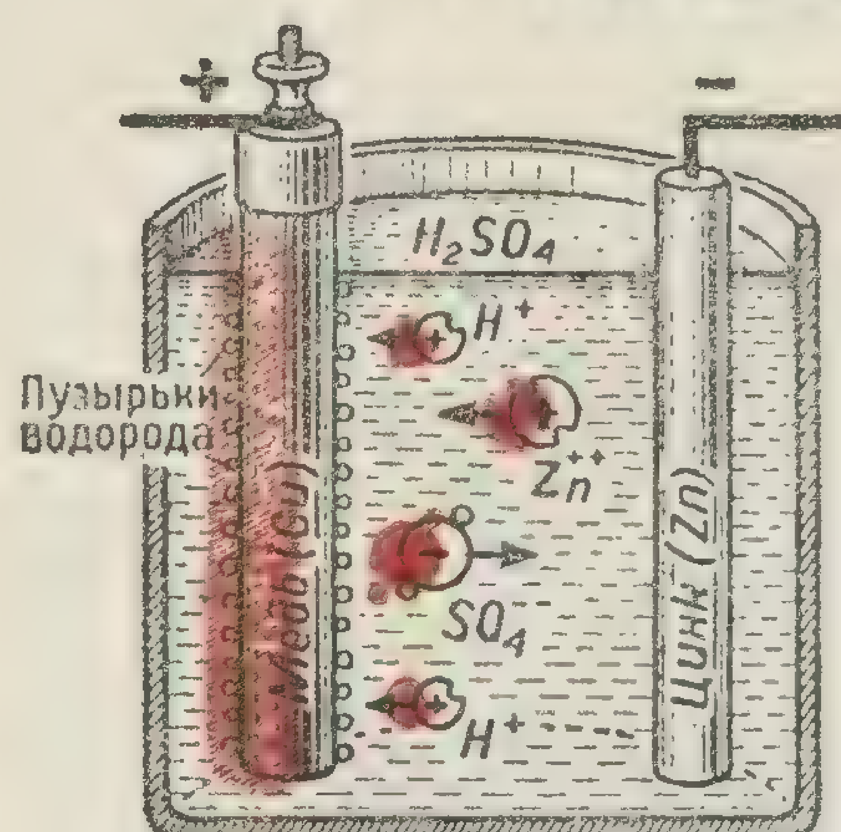


АНАЛОГИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ЦЕПЬЮ

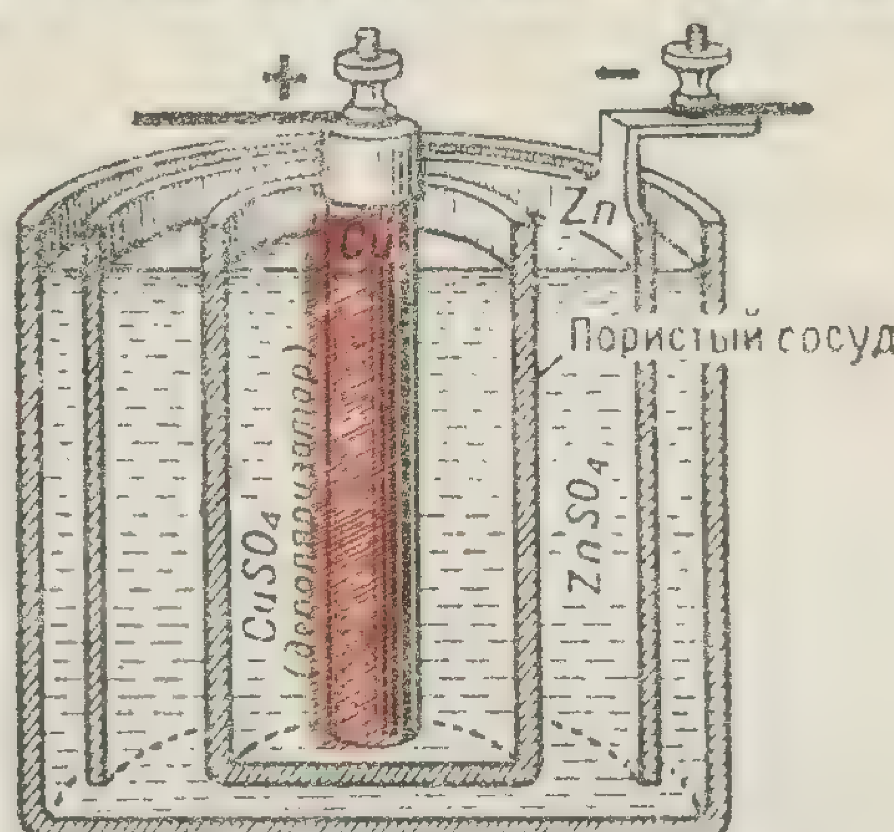
Э И Расовский

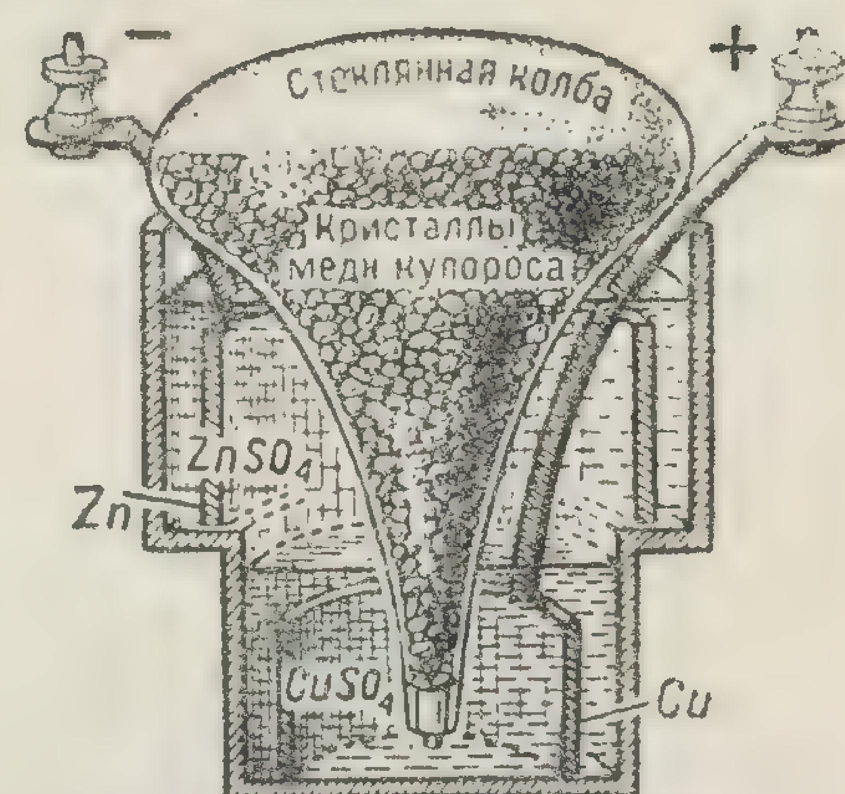
Худ. А Меньшиков

ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ



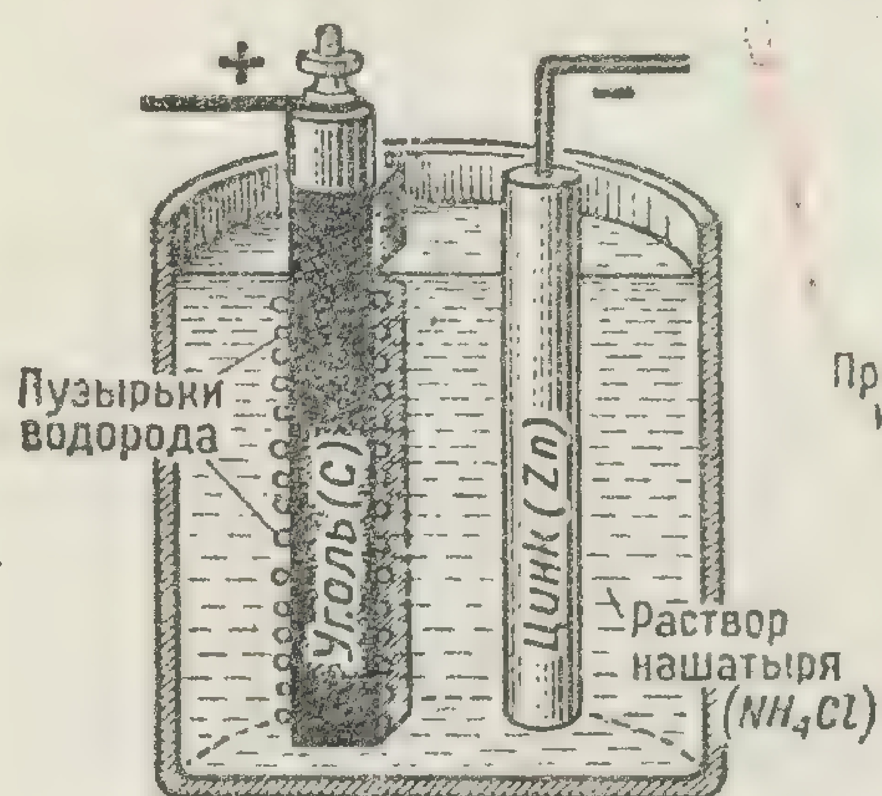
Поляризующийся элемент



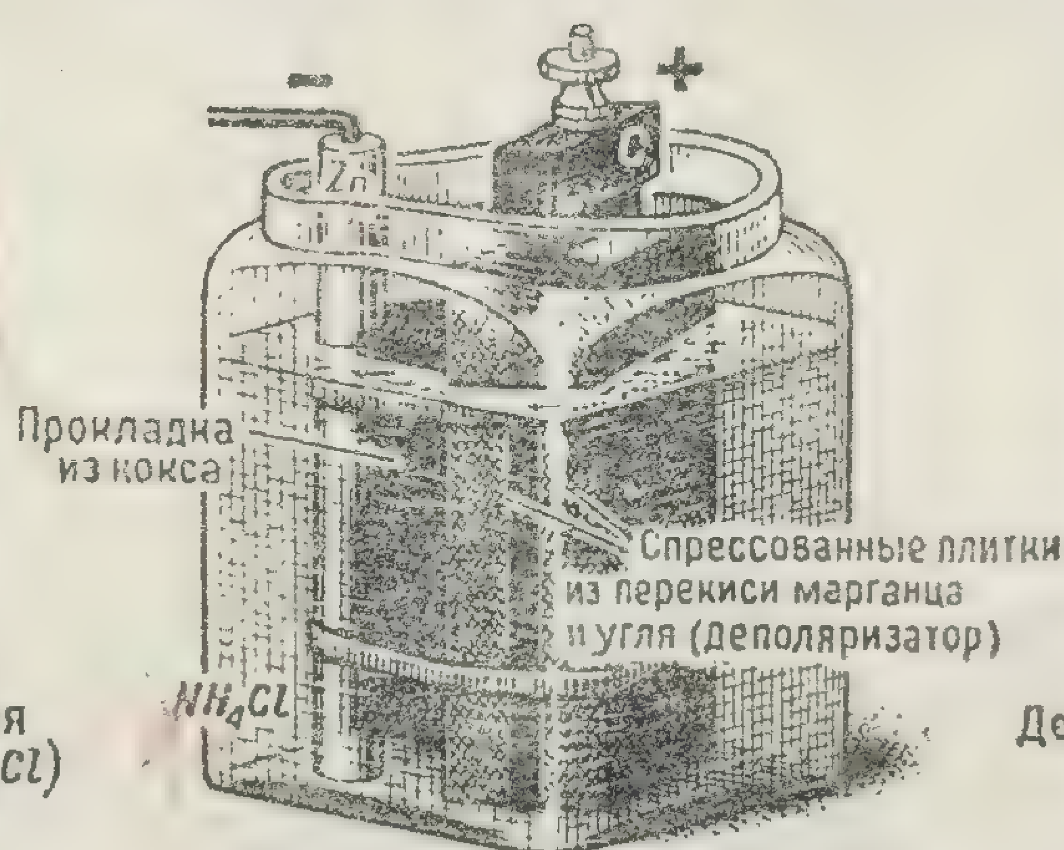


Элементы с деполяризатором

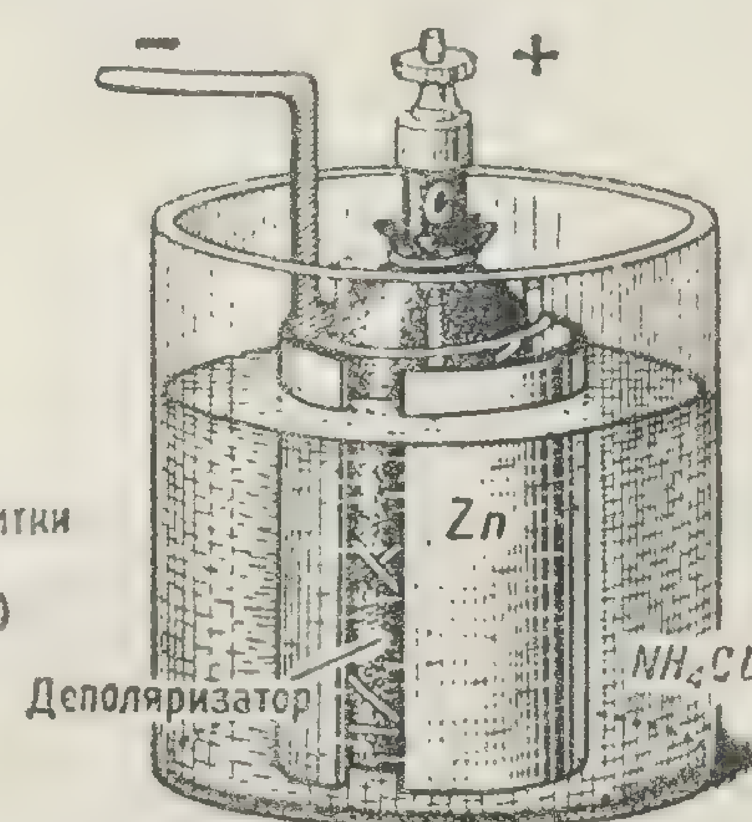
МЕДНО-ЦИНКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ



Поляризующийся элемент

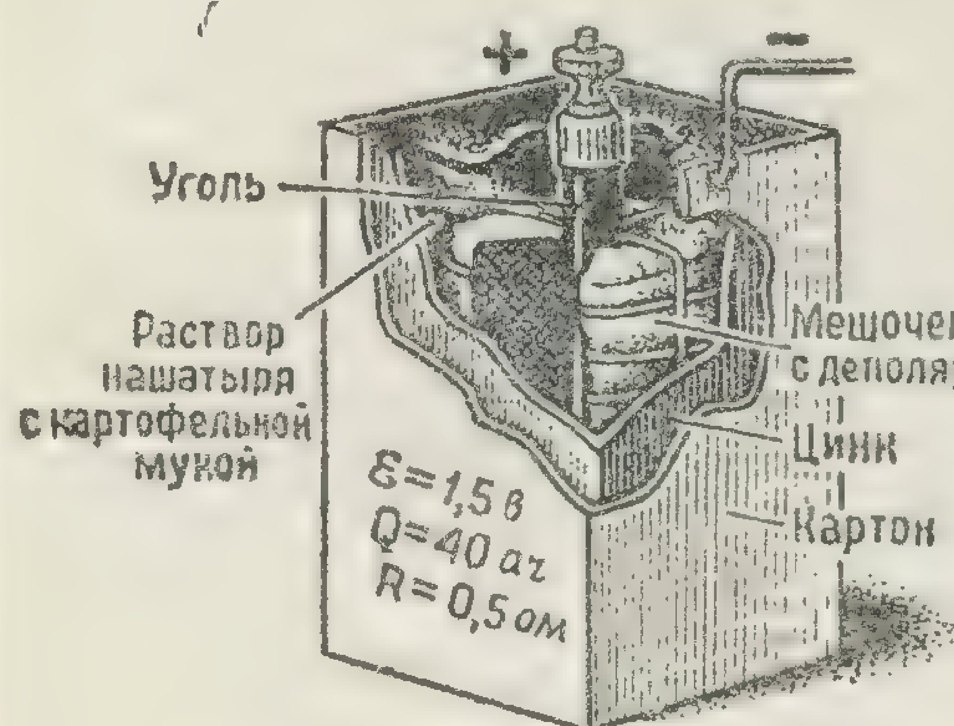


Пластинчатый

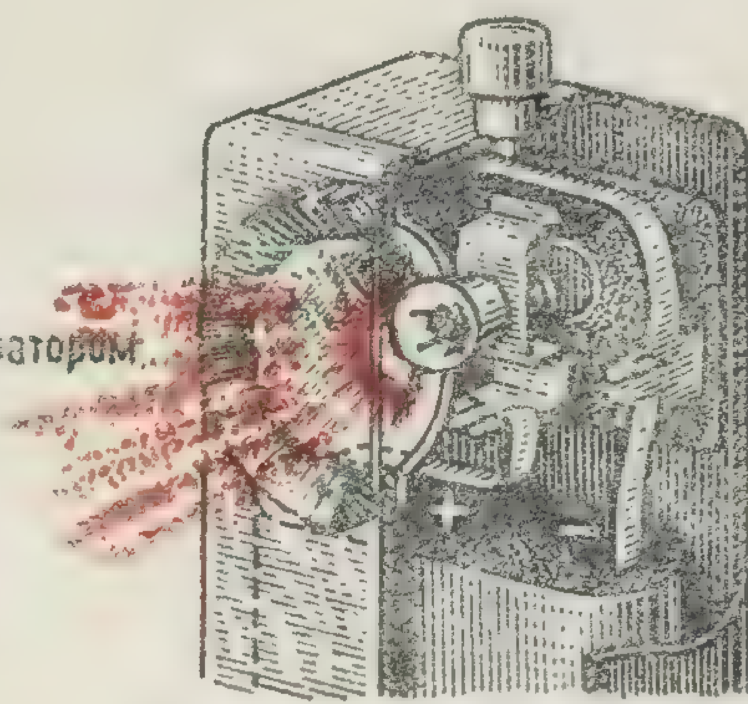


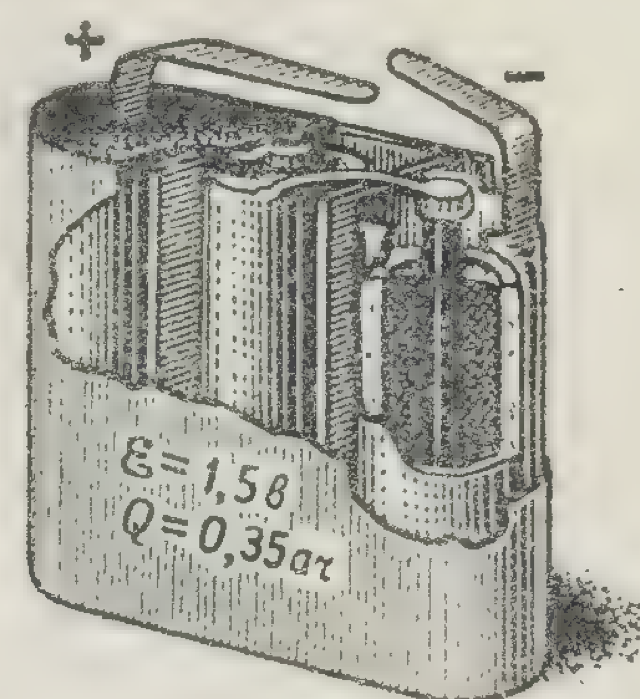
Мешочный

Элемент с деполяризатором



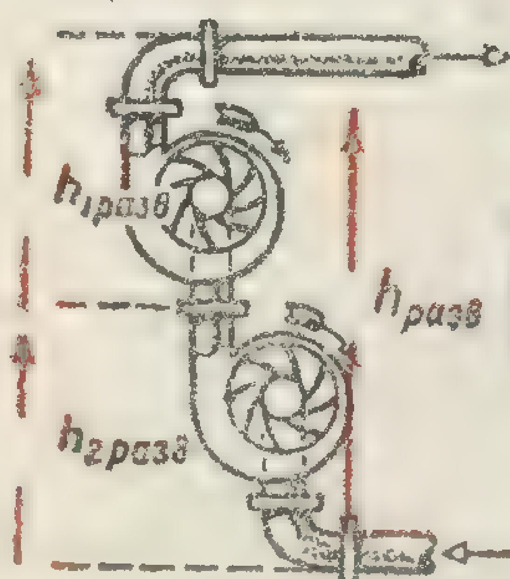
Сухой элемент


Карманный фонарь

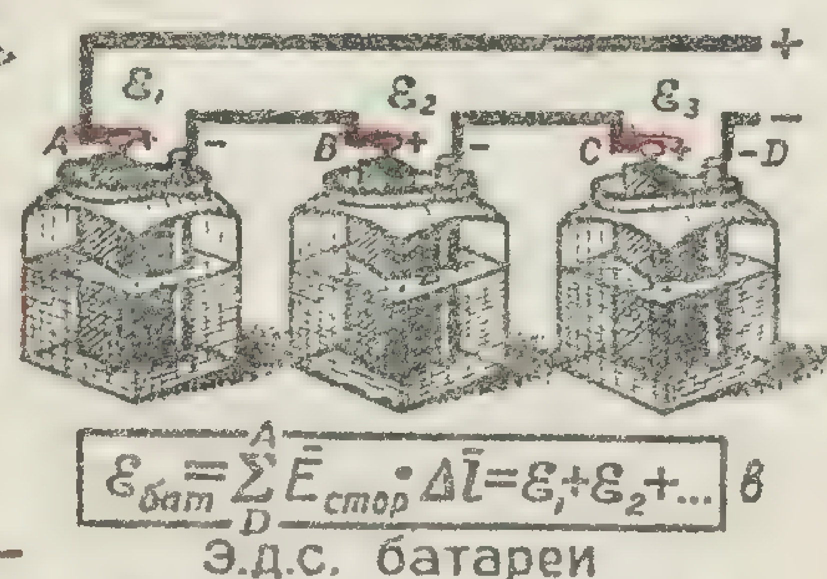


Батарейка к карманному фонарю

УГОЛЬНО-ЦИНКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ



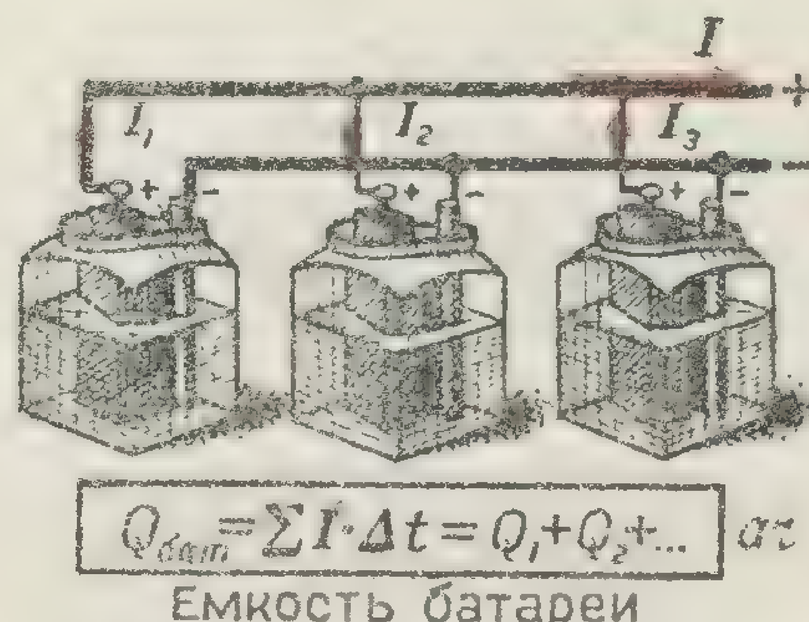
Гидравлическая аналогия



$$\mathcal{E}_{бат}=\sum_D^A \bar{E}_{стор}\cdot\Delta\bar{l}=\mathcal{E}_1+\mathcal{E}_2+\dots \text{ в}$$

Э.д.с. батареи

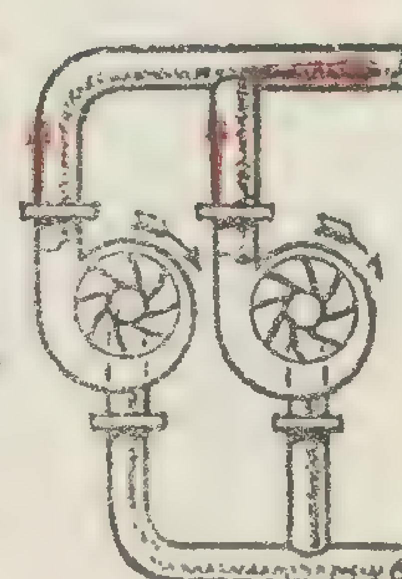
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ соединение элементов



$$Q_{бат}=\sum I\cdot\Delta t=Q_1+Q_2+\dots \text{ ач}$$

Емкость батареи

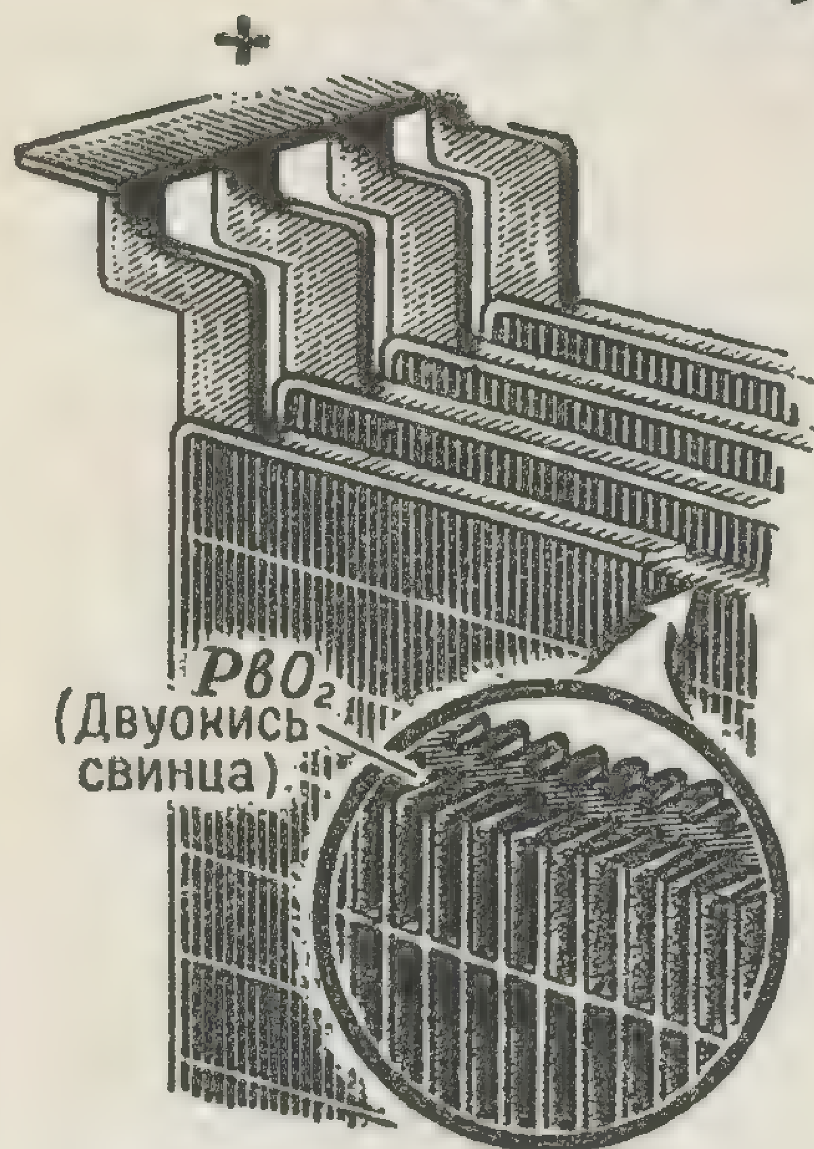
ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ соединение элементов


Гидравлическая аналогия

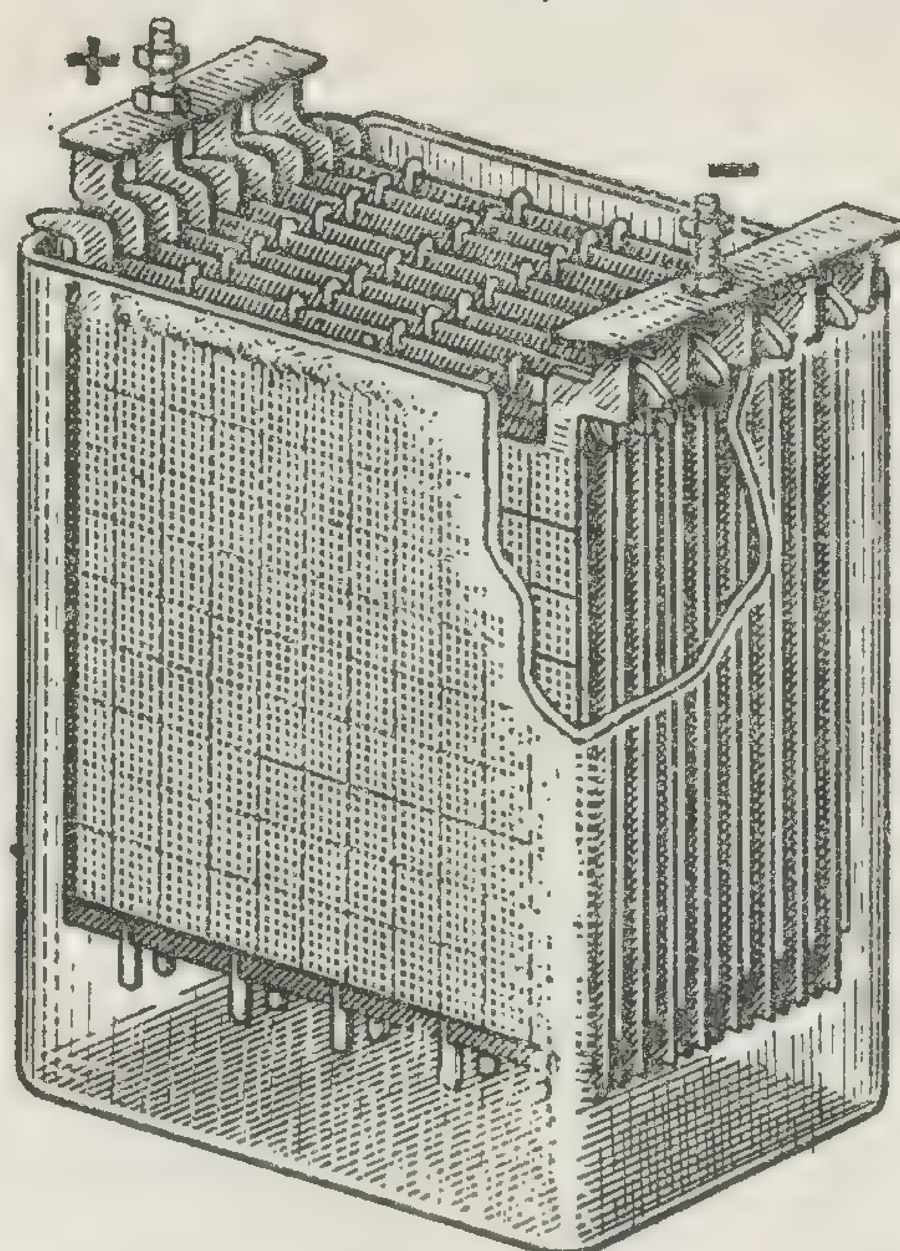
Э.И.Расовский

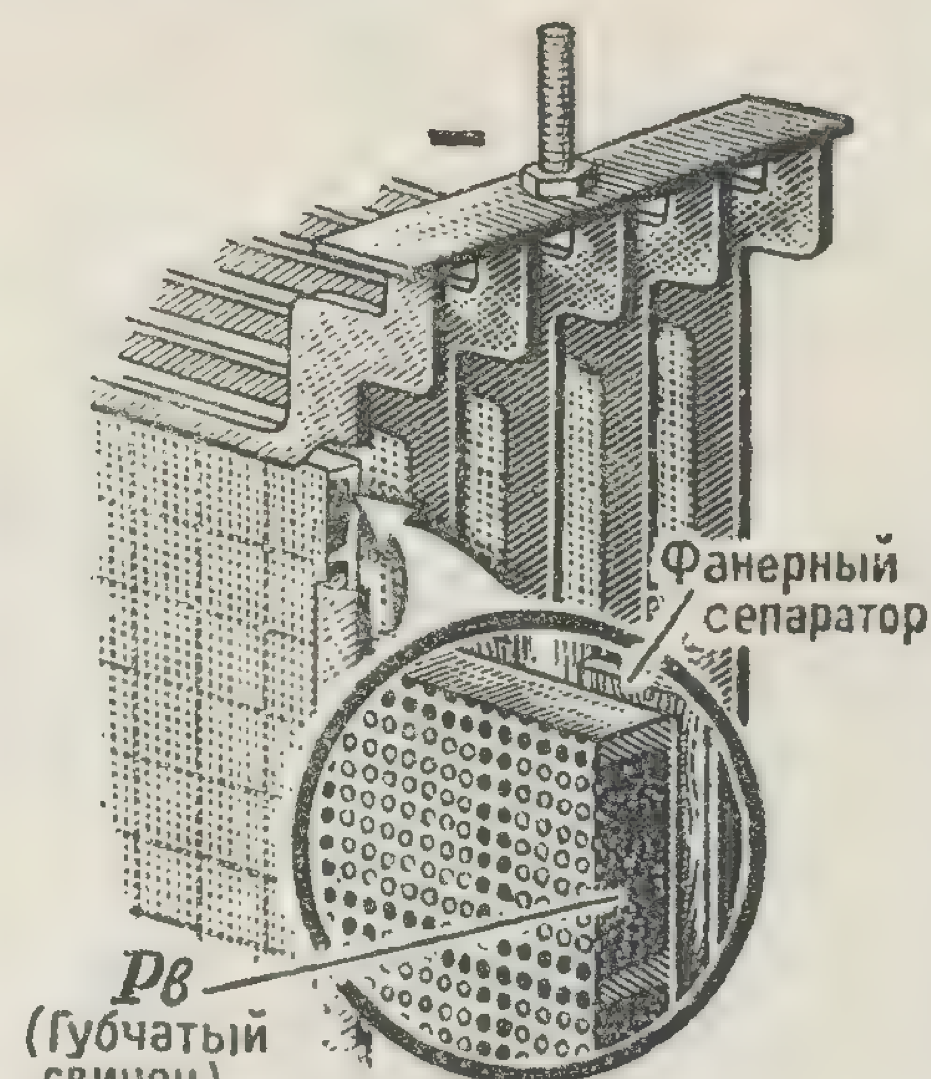
Худ. А.Меньшиков

СВИНЦОВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ



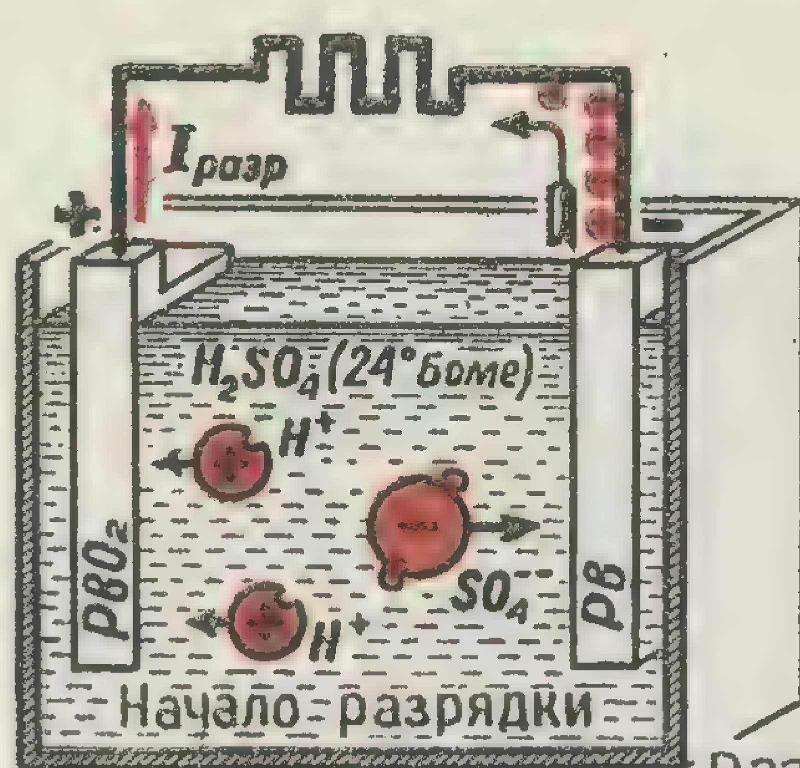
Положительная пластина большой поверхности

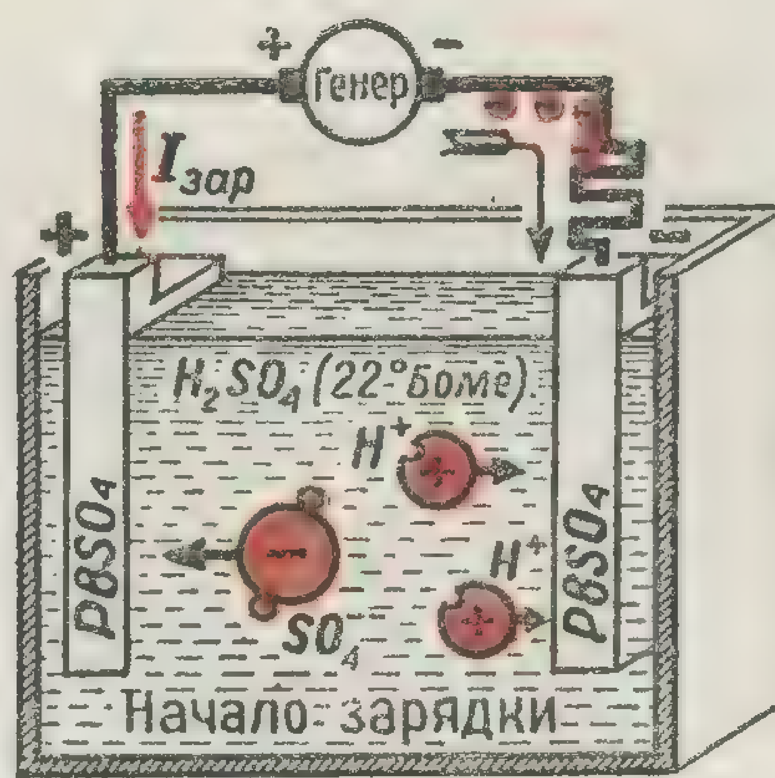


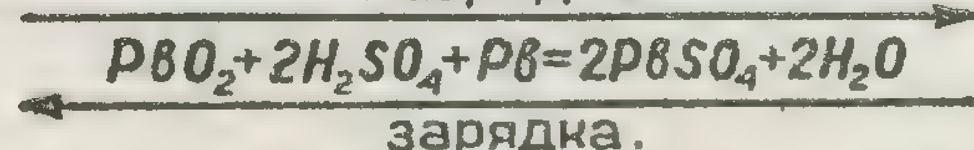


Отрицательная коробчатая пластина

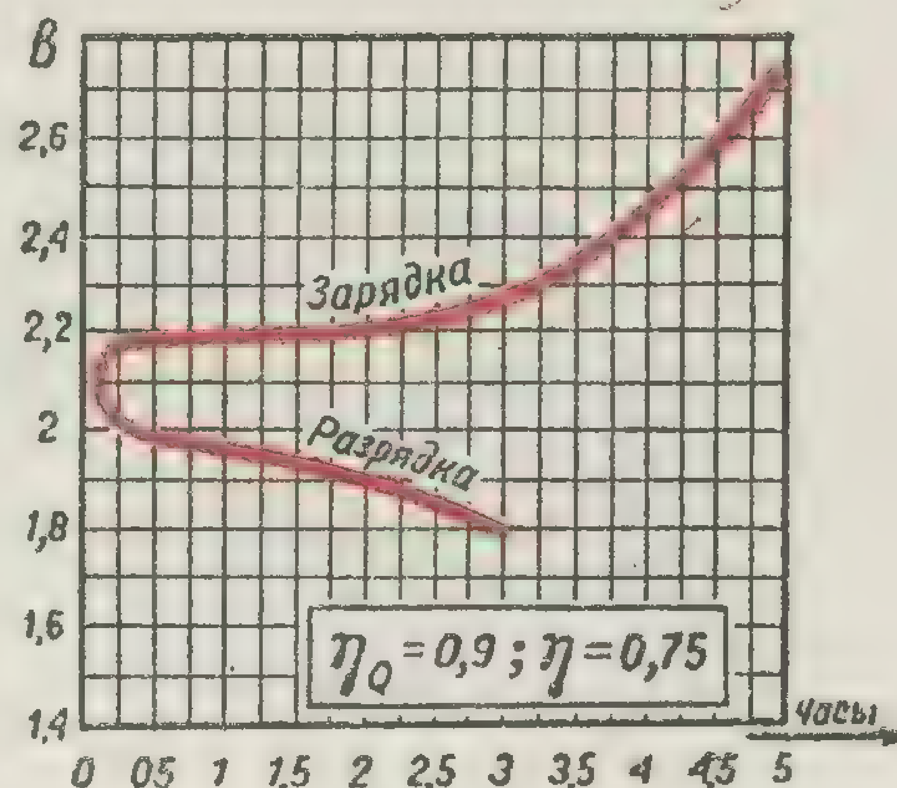
СТАЦИОНАРНЫЙ АККУМУЛЯТОР







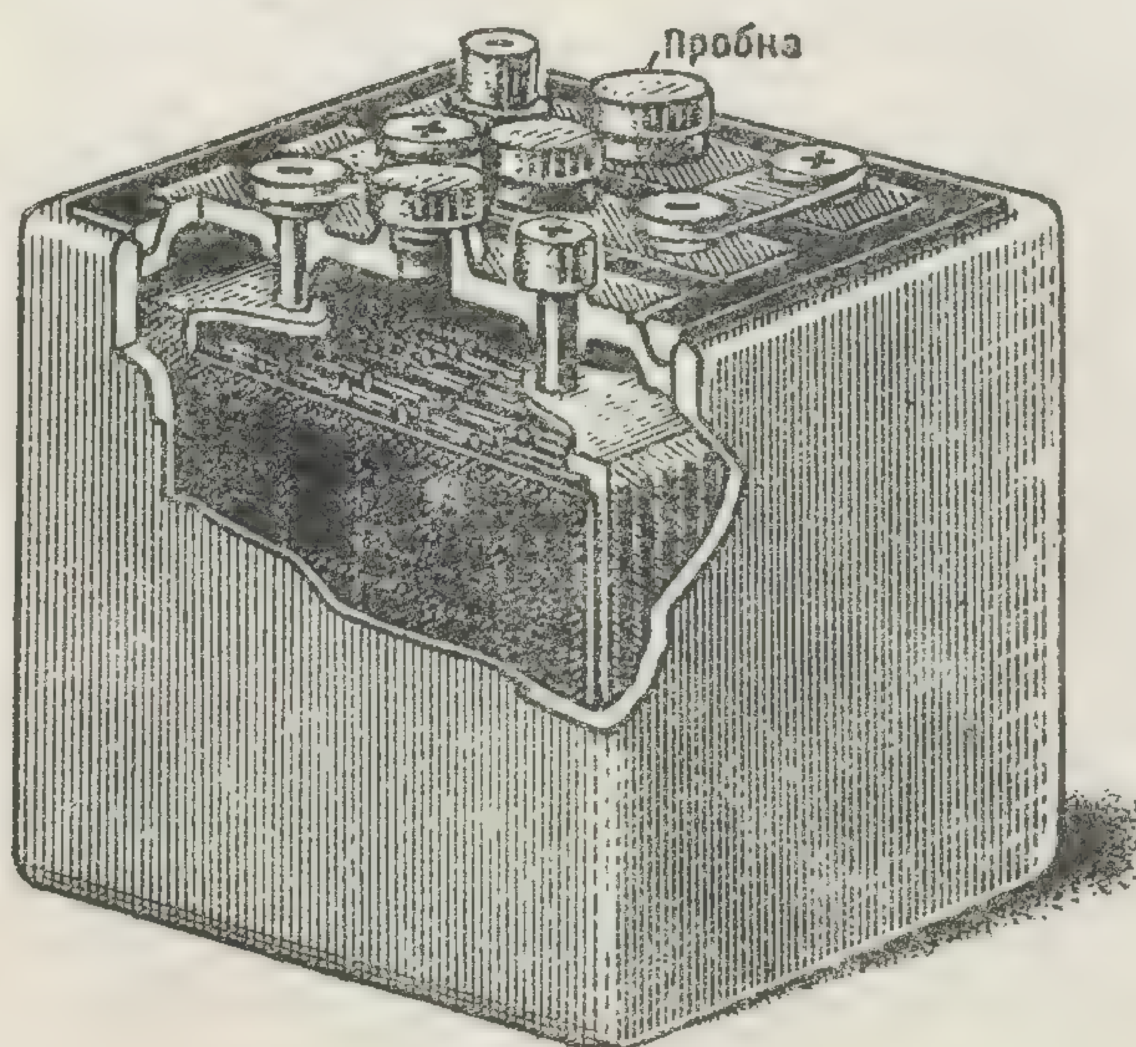
ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ В АККУМУЛЯТОРЕ



КРИВЫЕ ЗАРЯДКИ И РАЗРАДКИ

$$\eta_Q = \frac{Q_{разр}}{Q_{зар}} = \frac{\Sigma I_{рз} \cdot \Delta t}{\Sigma I_{зр} \cdot \Delta t}$$

Отдача аккумулятора



$$\eta = \frac{W_{разр}}{W_{зар}} = \frac{\Sigma U I_{рз} \cdot \Delta t}{\Sigma U I_{зр} \cdot \Delta t}$$

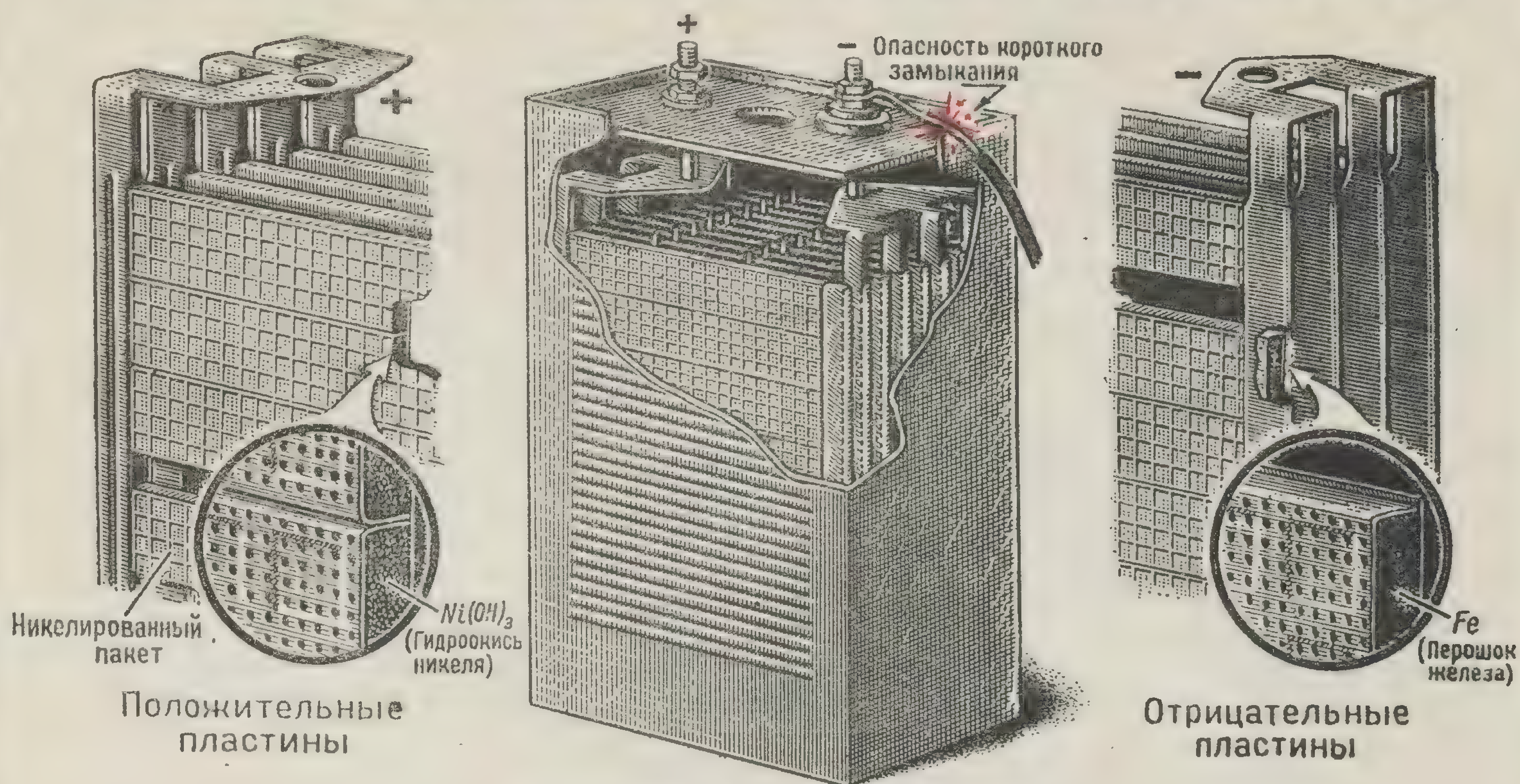
Коэффициент полезного действия

СТАРТЕРНЫЙ АККУМУЛЯТОР
(батарея из трех элементов)

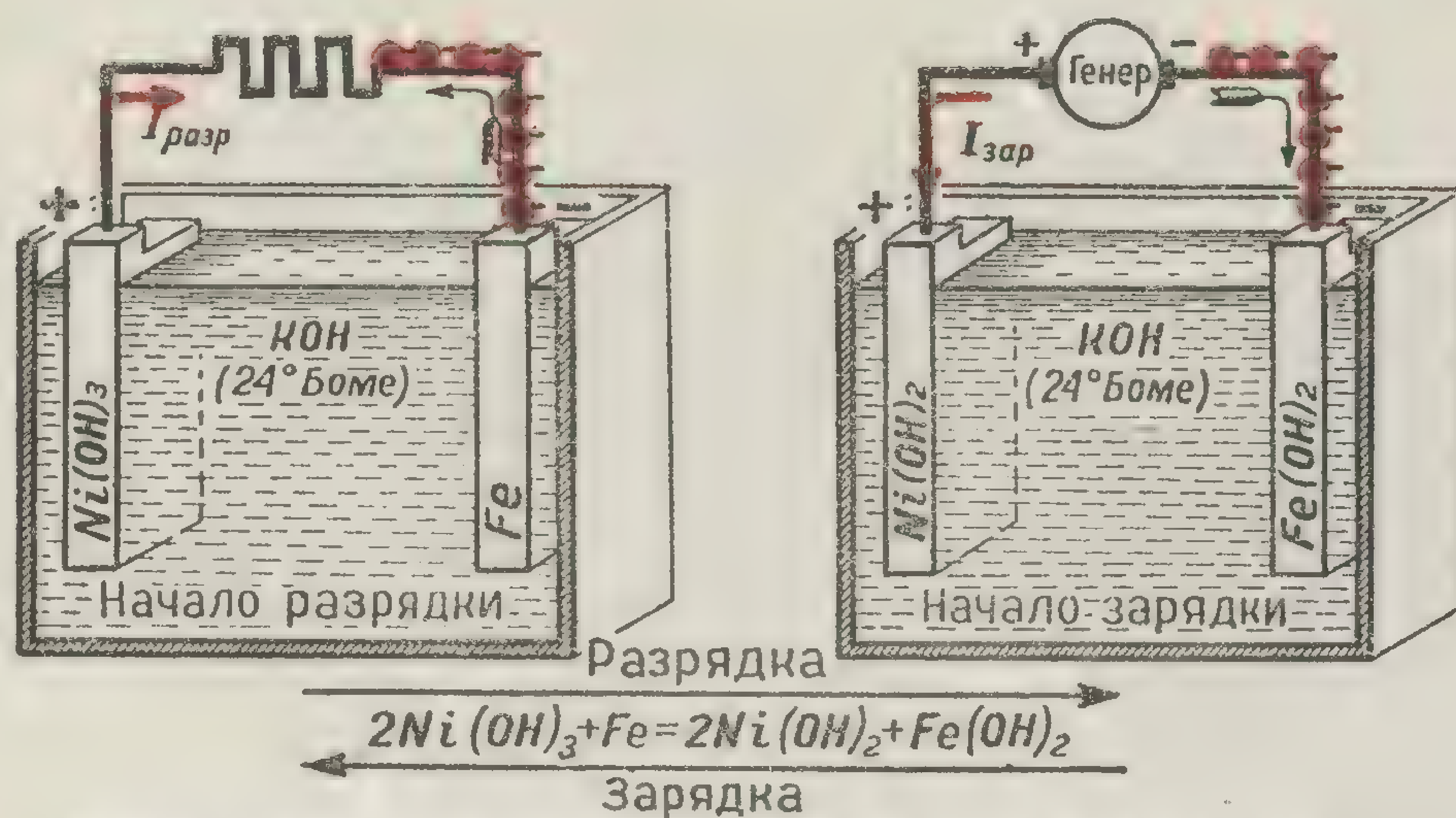
Э.И.Расовский.

Худ А Меньшиков

ЖЕЛЕЗО-НИКЕЛЕВЫЕ (ЩЕЛОЧНЫЕ) АККУМУЛЯТОРЫ



ЩЕЛОЧНОЙ АККУМУЛЯТОР

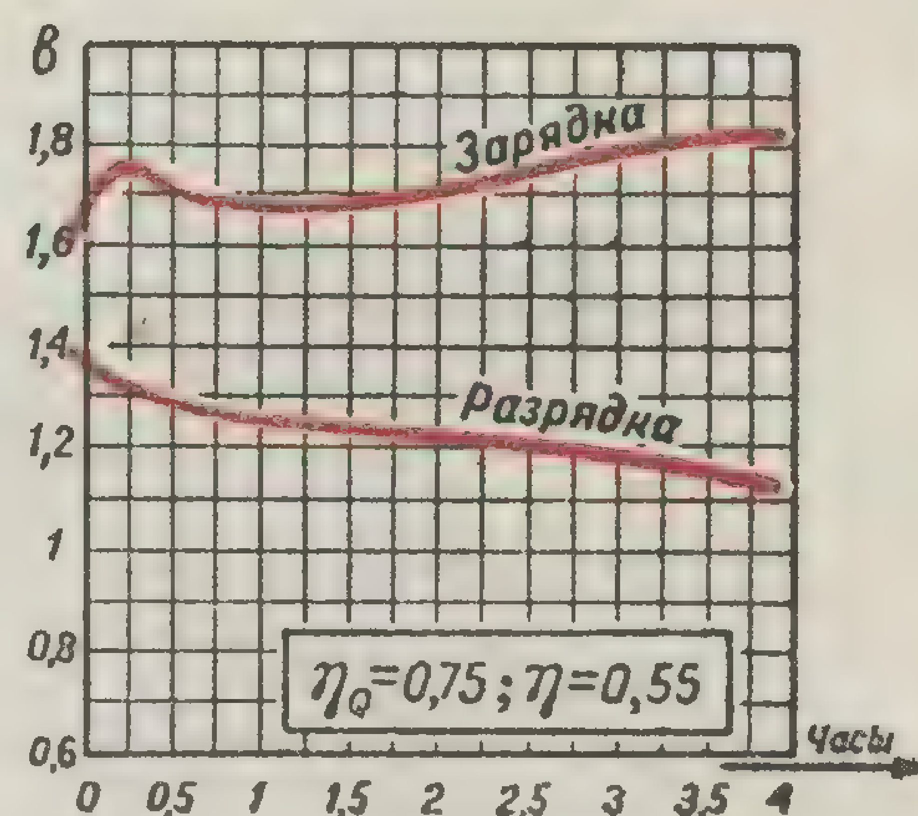


Разрядка

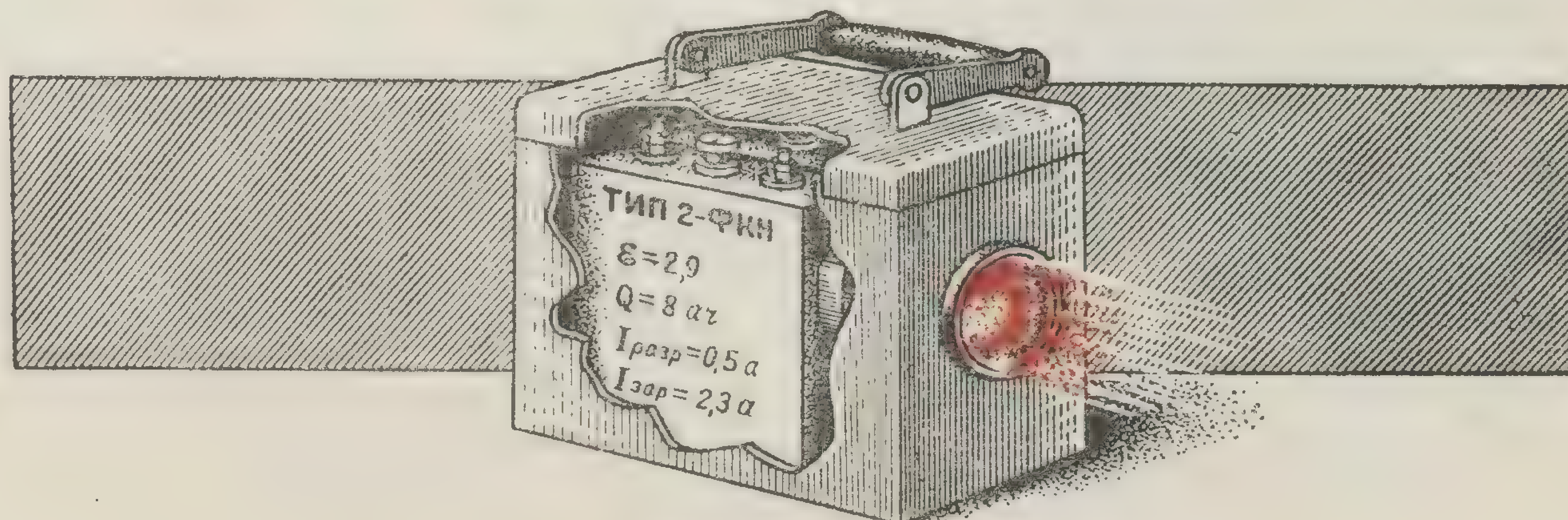
$$2Ni(OH)_3 + Fe = 2Ni(OH)_2 + Fe(OH)_2$$

Зарядка

ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ В АККУМУЛЯТОРЕ



КРИВЫЕ ЗАРЯДКИ И РАЗРЯДКИ

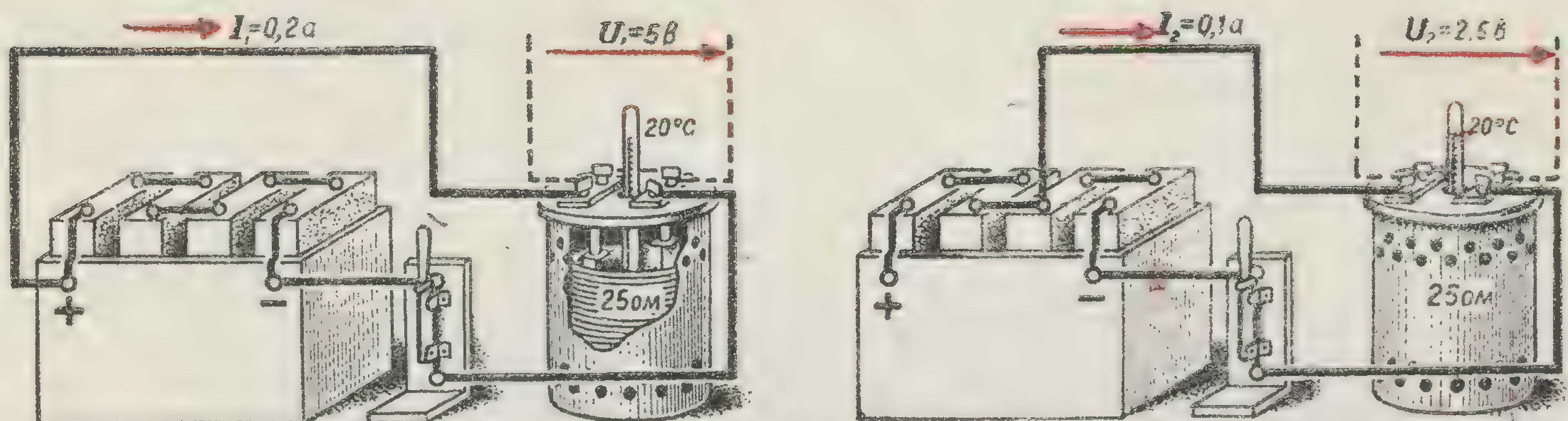


Переносный аккумуляторный фонарь

Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

ЗАКОН ОМА



линейная зависимость между напряжением и током в омическом сопротивлении

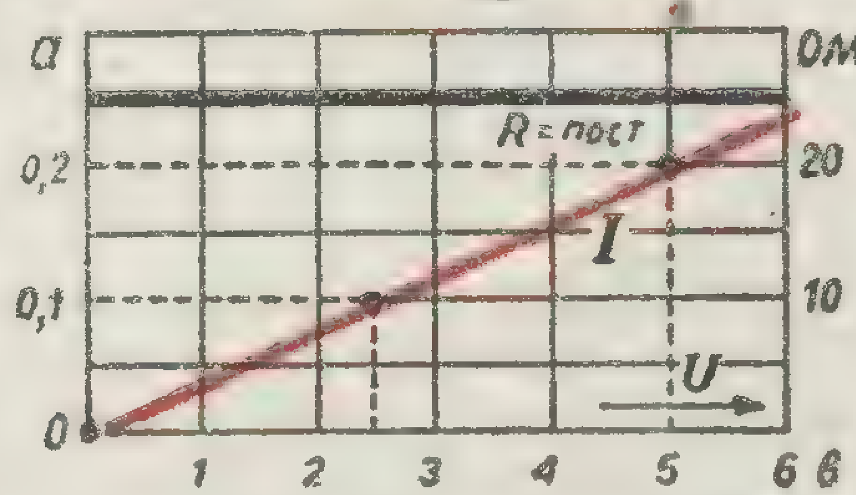
$\bar{\delta}=\gamma\bar{E}$ $\frac{а}{мм^2}$

Плотность тока в проводнике пропорциональна напряженности электрического поля



$\frac{U}{I}=пост=R$ ом

Отношение напряжения к току в омическом проводнике есть величина постоянная



Вольтамперная характеристика омического сопротивления

ЗАКОН ОМА.

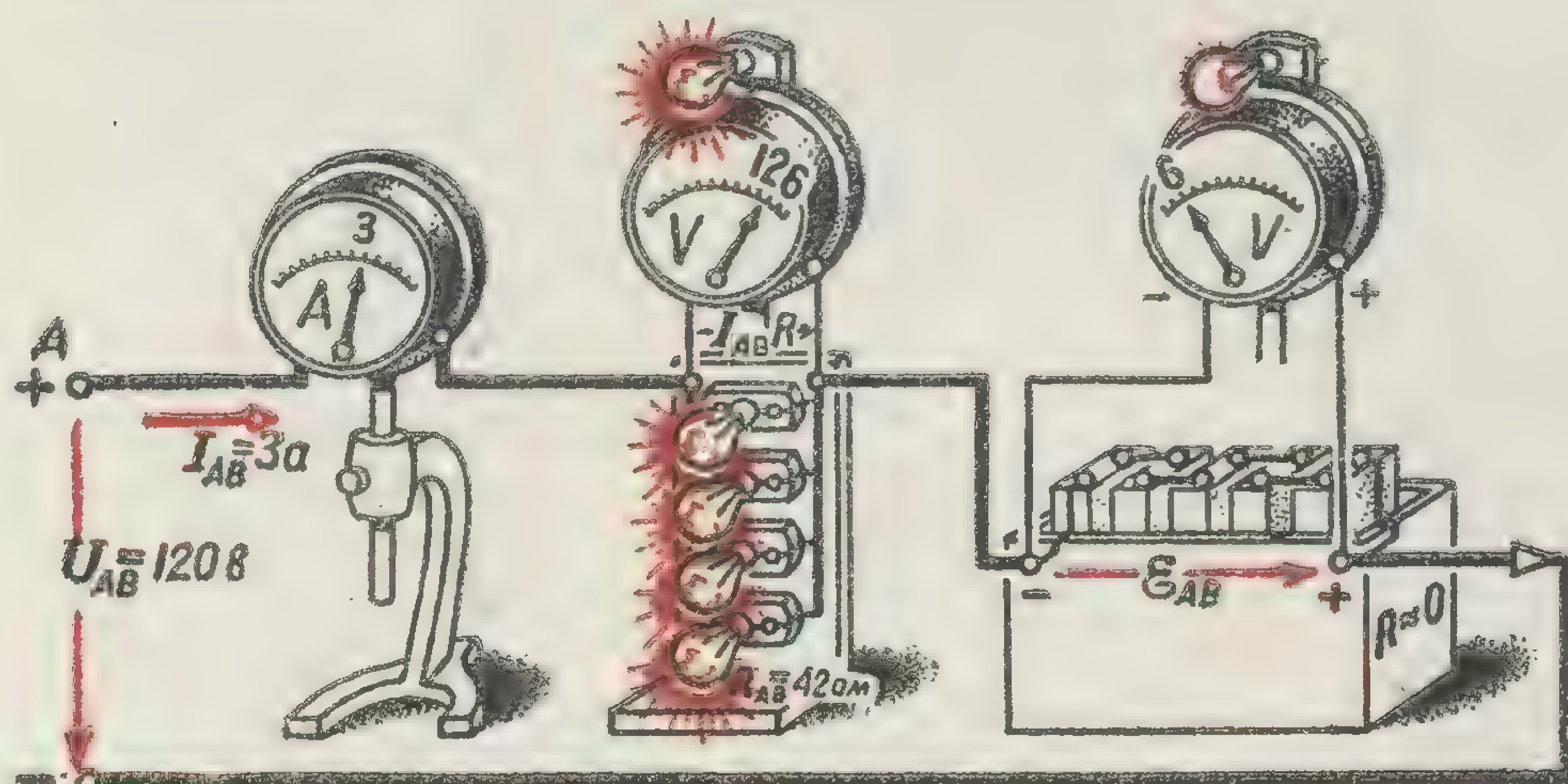
$U=IR$ в

Напряжение

• IR — ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СОПРОТИВЛЕНИИ R •

$I=\frac{U}{R}$ а

Ток



A + — U_{AB} → B −

I_{AB}, R_{AB}, $\mathcal{E}_{AB}$

схема

Напряжение на зажимах участка цепи с положительно направленными током и э.д.с.

$I_{AB}=\frac{U_{AB}+\mathcal{E}_{AB}}{R_{AB}}$ а

Электрический ток

Электрический ток в участке цепи возникает под совместным влиянием приложенного напряжения и действующей э.д.с.

$\bar{\delta}=\gamma(\bar{E}+\bar{E}_{стор})$ $\frac{а}{мм^2}$

Плотность тока

$U_{AB}=I_{AB}\cdot R-\mathcal{E}_{AB}$ в

Напряжение на зажимах участка цепи равно падению напряжения в его сопротивлении за вычетом положительно направленной э.д.с.

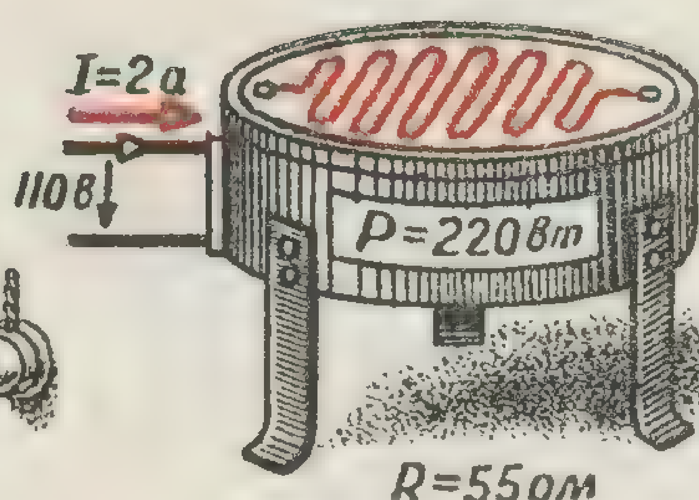
Закон Ома для участка цепи с действующей в нем э.д.с.

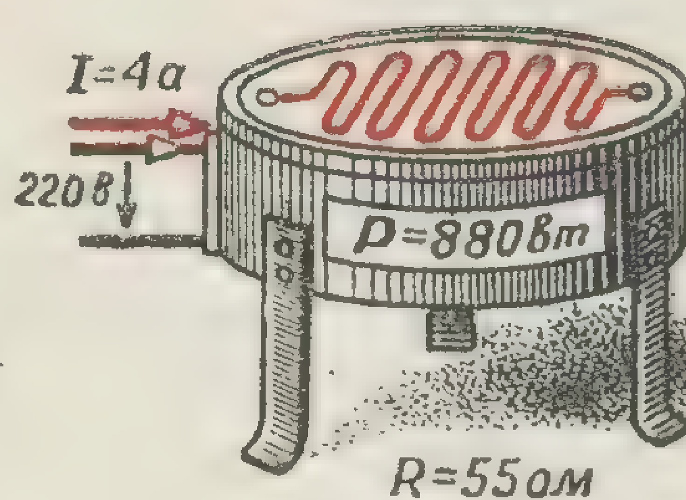
Э.И. Расовский

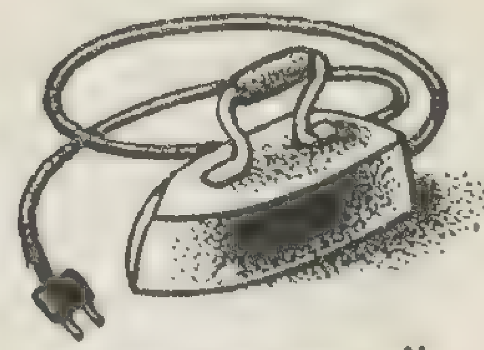
Худ. А. Меньшиков

ЗАКОН ЛЕНЦА-ДЖОУЛЯ


Электрический камин






Электрический утюг

$P = I^2R$ вт

Мощность, расходуемая на нагрев проводника пропорциональна квадрату тока

$\frac{P}{V} = \frac{\delta^2}{\gamma}$ $\frac{вт}{м^3}$

Расход мощности в единице объема проводника пропорционален квадрату плотности тока

ЗАКОН ЛЕНЦА-ДЖОУЛЯ

$P = UI = I^2R = \frac{U^2}{R}$ вт

Тепловые потери

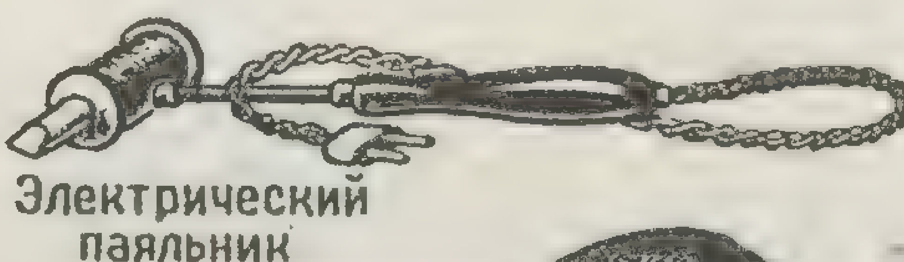
При постоянном **токе** потеря мощности **прямо** пропорциональна сопротивлению, а при постоянном **напряжении — обратно** пропорциональна сопротивлению проводника

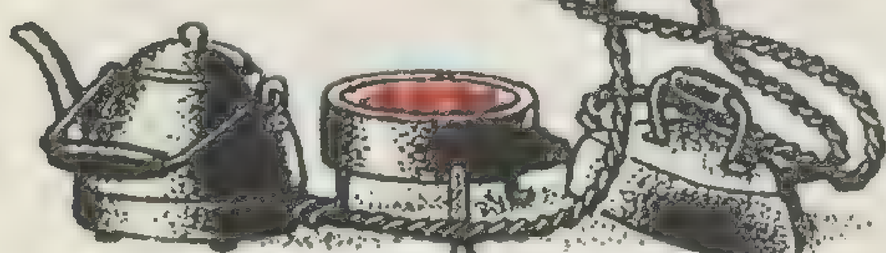
1 дж (вт сек) = 0,239 кал ; 1 квтч = 860 ккал

$W = 0{,}239 I^2Rt$ кал

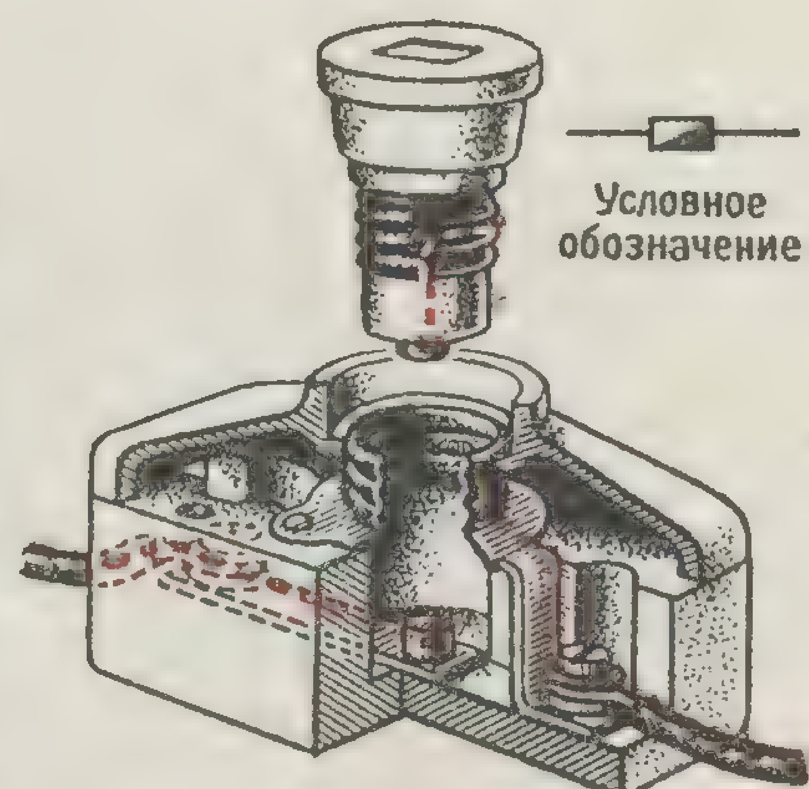
Выделяемое тепло


Перегрев от неплотного контакта


Электрический паяльник


Опасность перегрузки проводов электрическим током


Электросварка (изобретена Н.Г.Славяновым в 1890 г.)



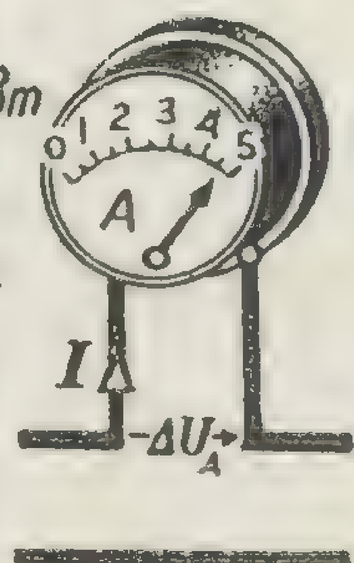
Плавкий предохранитель

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА

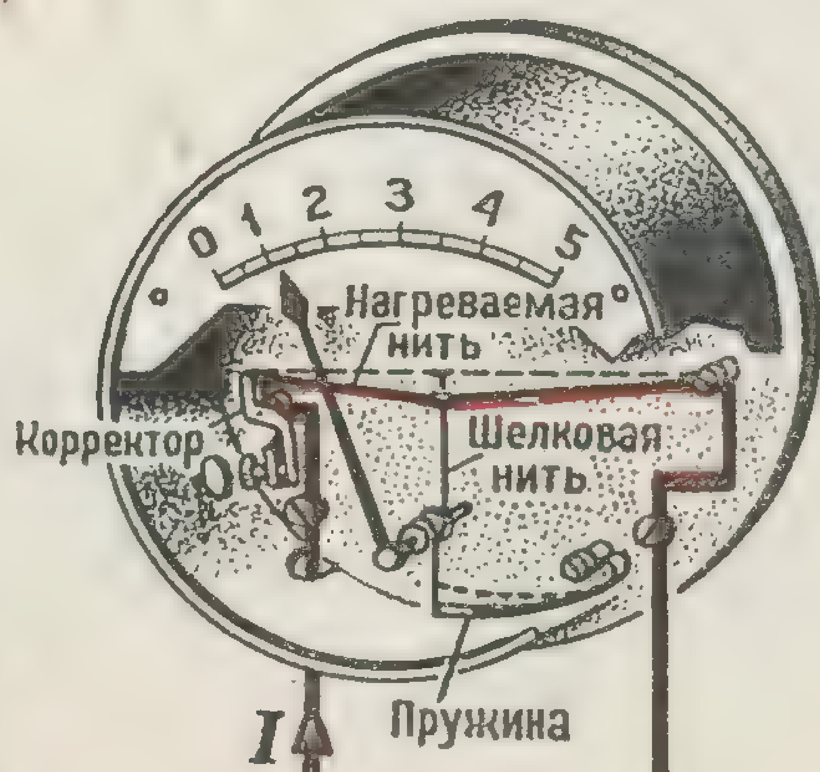
$\Delta P_A = \Delta U_A \cdot I = I^2 R_A$ вт

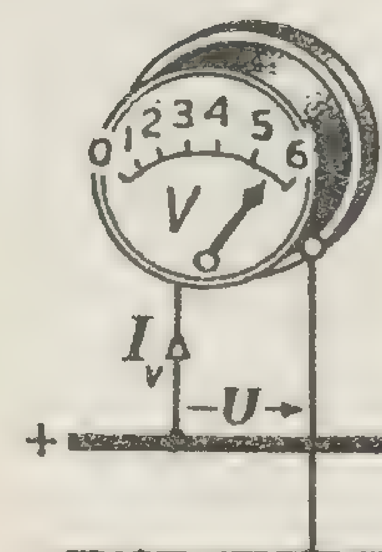
Собственное потребление прибора

$I_A = 5a$; $\Delta U_A = 0{,}5в$; $R_A = 0{,}1ом$; $\Delta P_A = 2{,}5вт$



Амперметр





Вольтметр

$\Delta P_V = U \cdot I_V = \frac{U^2}{R_V}$ вт

Собственное потребление прибора

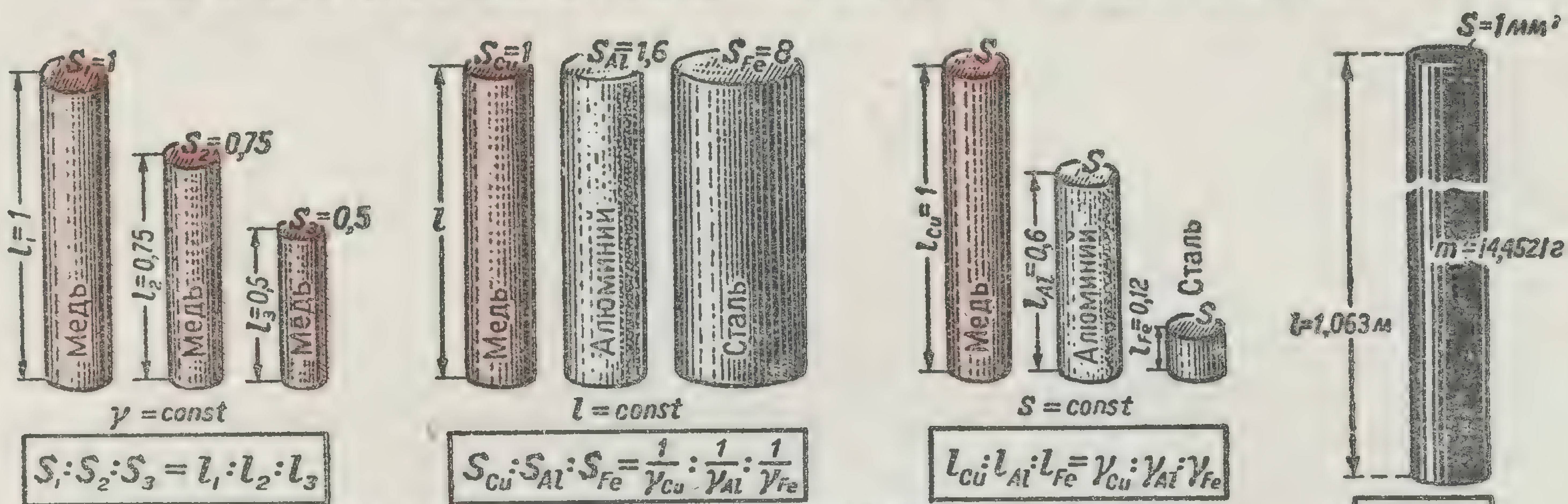
$U_V = 6в$; $I_V = 150ма$; $R_V = 40ом$; $\Delta P_V = 0{,}9вт$

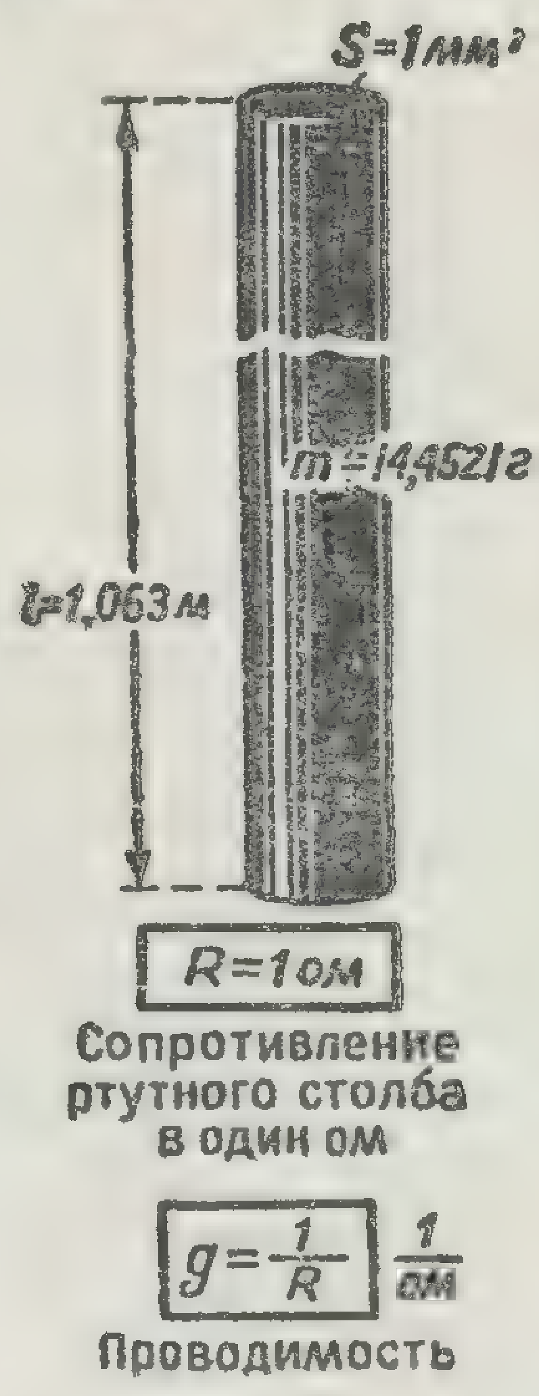
ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ





Сопротивление ртутного столба в один ом

ПРОВОДНИКИ ОДИНАКОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

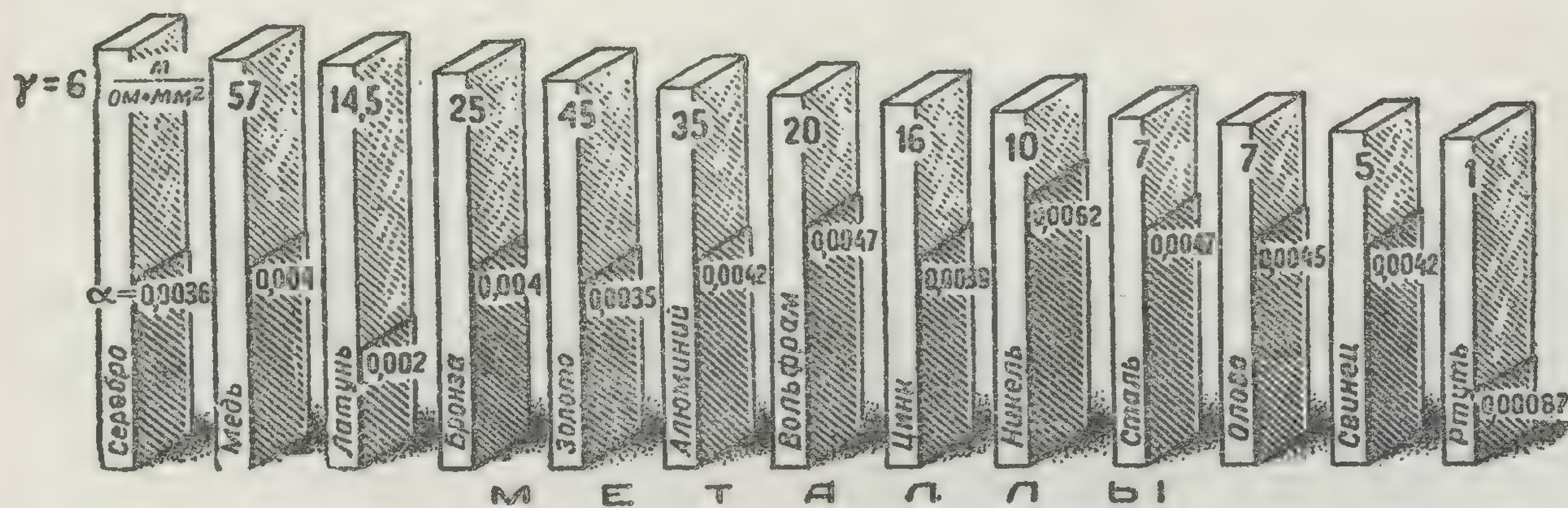
$R = \frac{l}{\gamma S}$ ом

Сопротивление

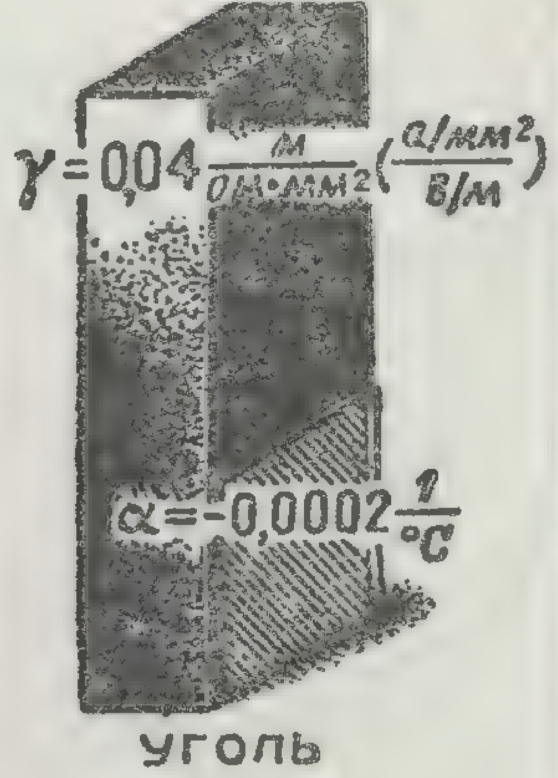
Электрическое сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и обратно пропорционально поперечному сечению

$g = \frac{1}{R}$ $\frac{1}{ом}$

Проводимость



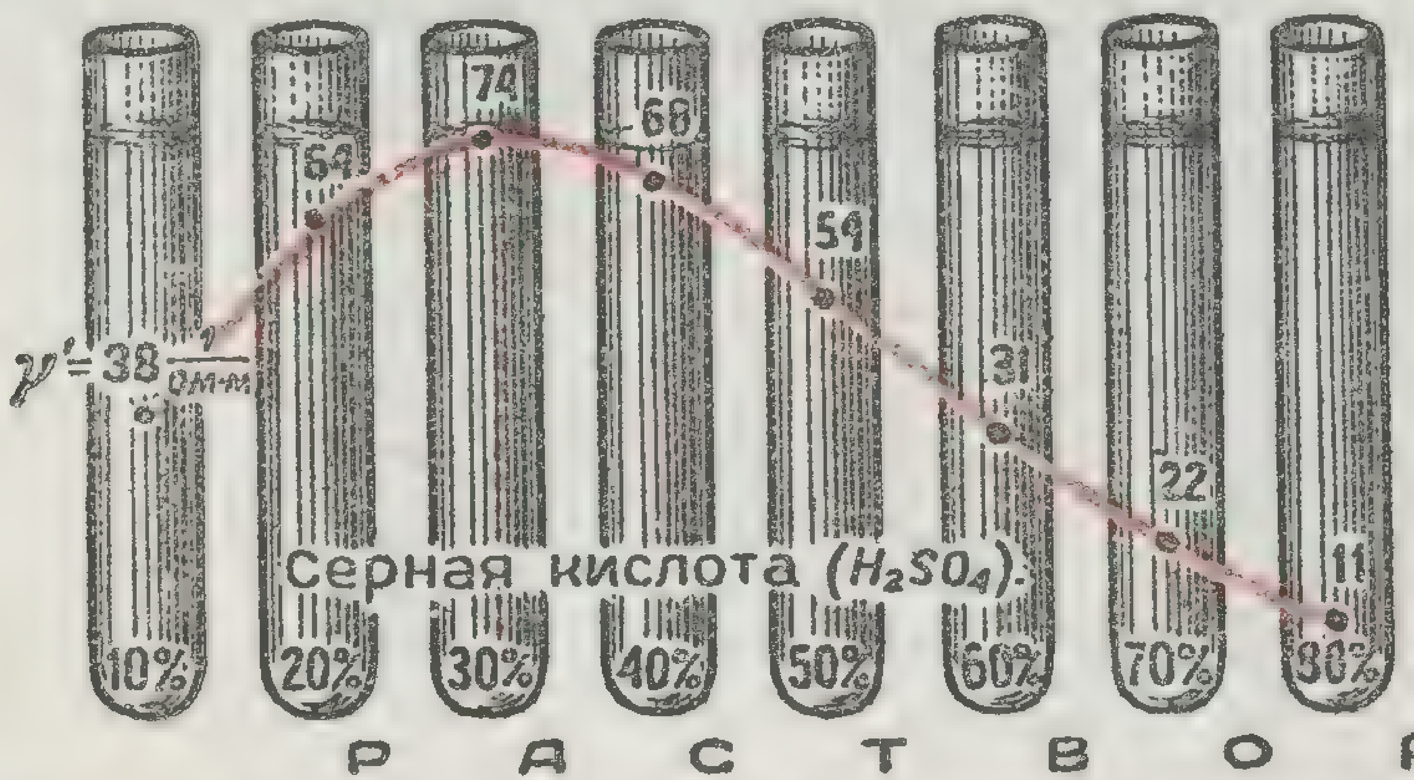
М Е Т А Л Л Ы

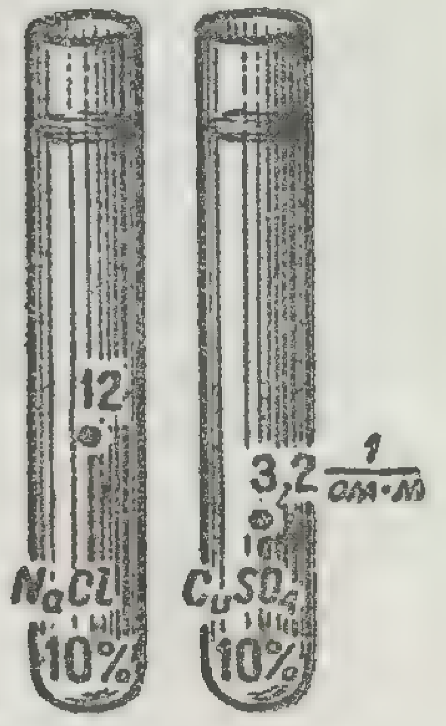


УГОЛЬ



сплавы высокого сопротивления





Р А С Т В О Р Ы

УДЕЛЬНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ γ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ СОПРОТИВЛЕНИЯ α НЕКОТОРЫХ ПРОВОДНИКОВ

$R_2 = R_1[1+\alpha(t_2^\circ - t_1^\circ)]$ ом

Сопротивление нагретого проводника

2а; 220в; 20°C; R_1=110ом; 1,67а; 220в; 70°C; R_2=132ом

$\Delta t^\circ = \frac{\Delta R\%}{100\alpha} = \frac{20}{0,4} = 50°C$

Расчет

Определение температуры медной обмотки

$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1} \cdot \frac{1}{t_2^\circ - t_1^\circ} = \frac{\Delta R\%}{100 \cdot \Delta t^\circ}$ $\frac{1}{°C}$

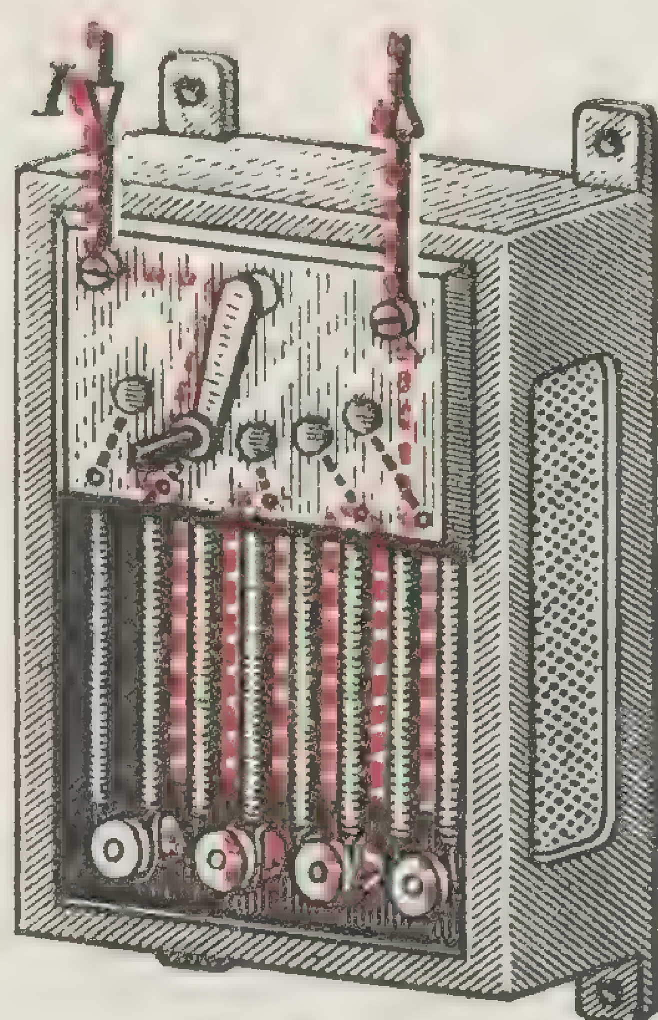
Температурный коэффициент сопротивления

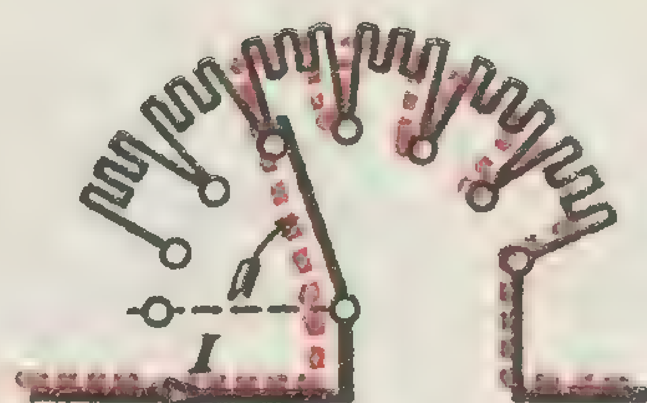
ЗАВИСИМОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Э.И.Расовский.

Худ. А Меньшиков

РЕОСТАТЫ

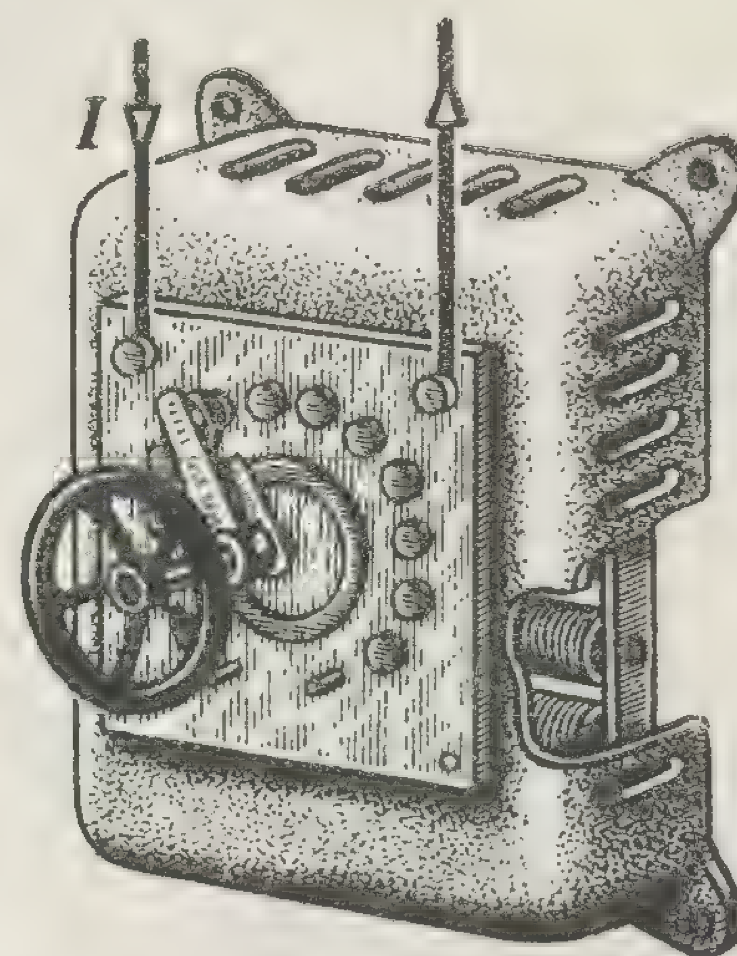




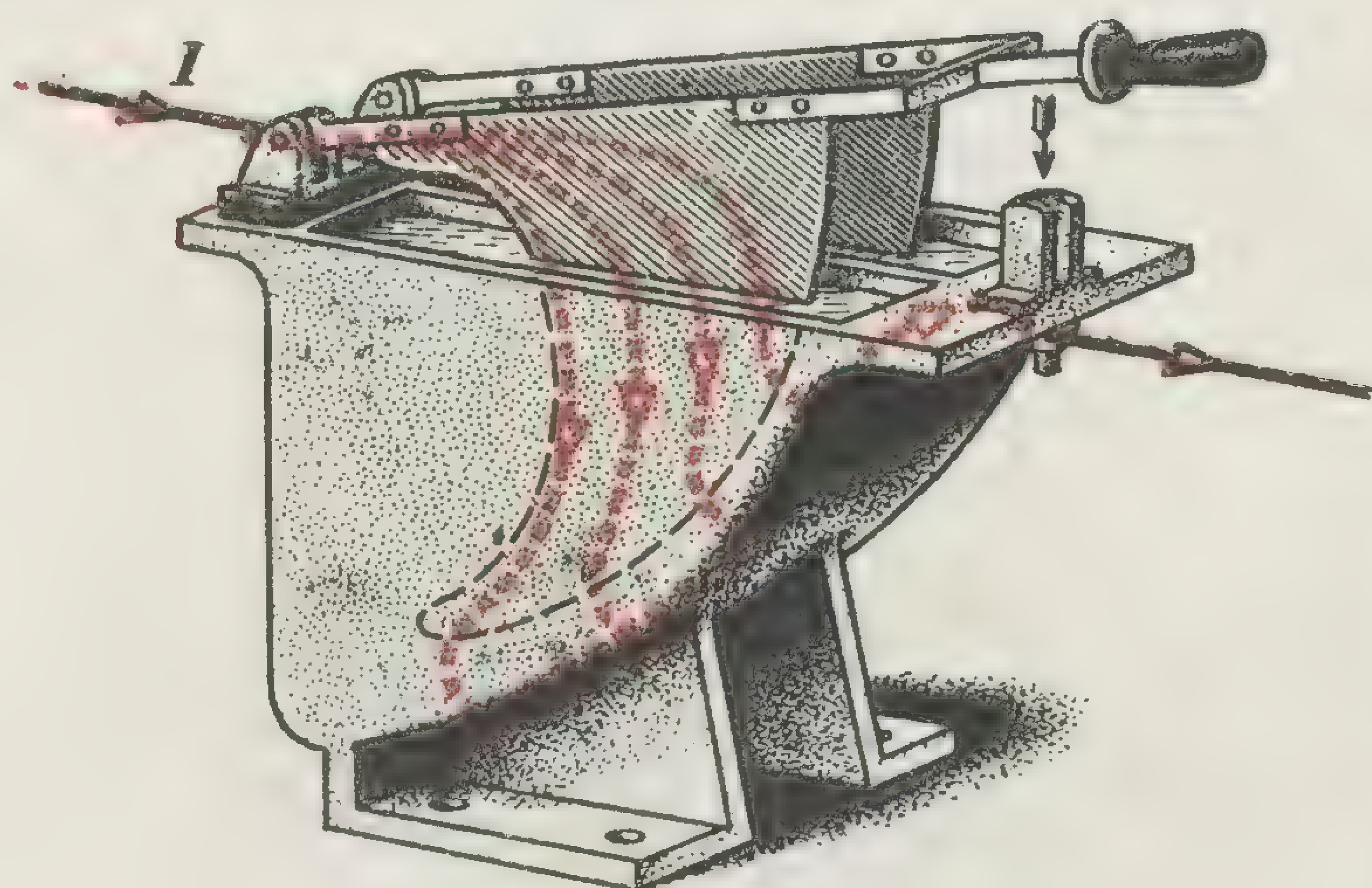
Схема



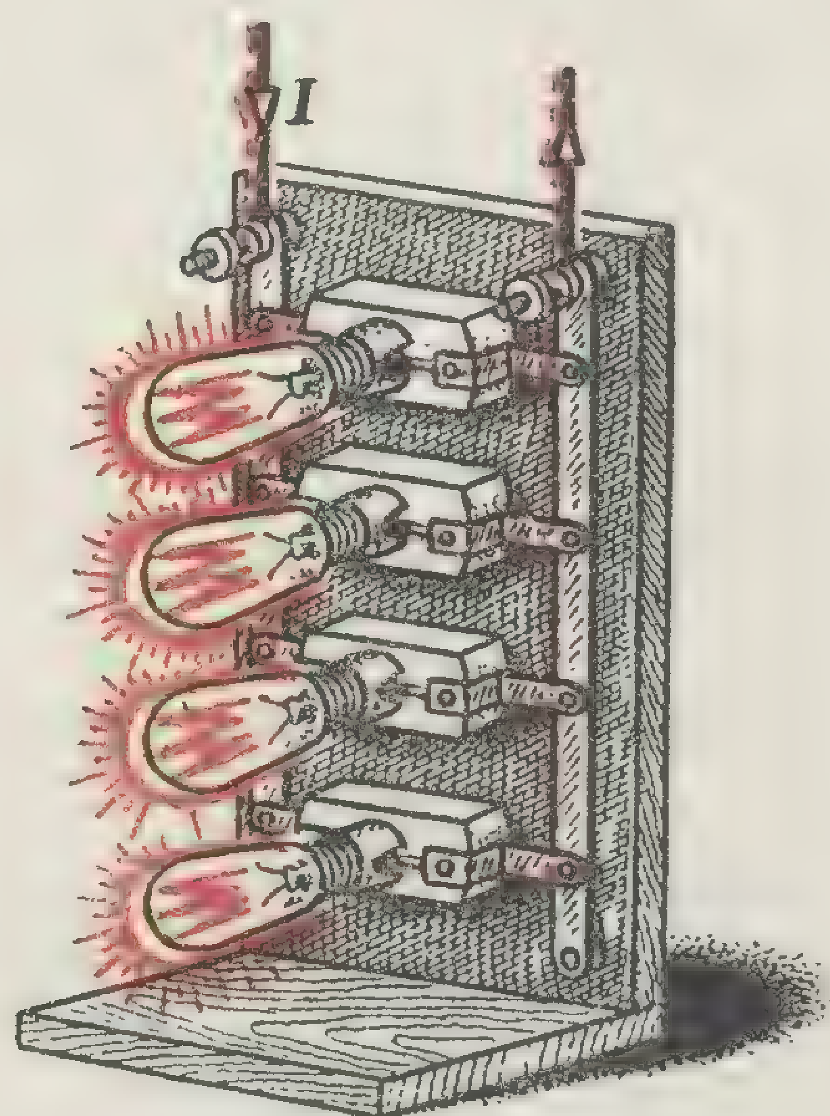
Упрощенная схема реостата



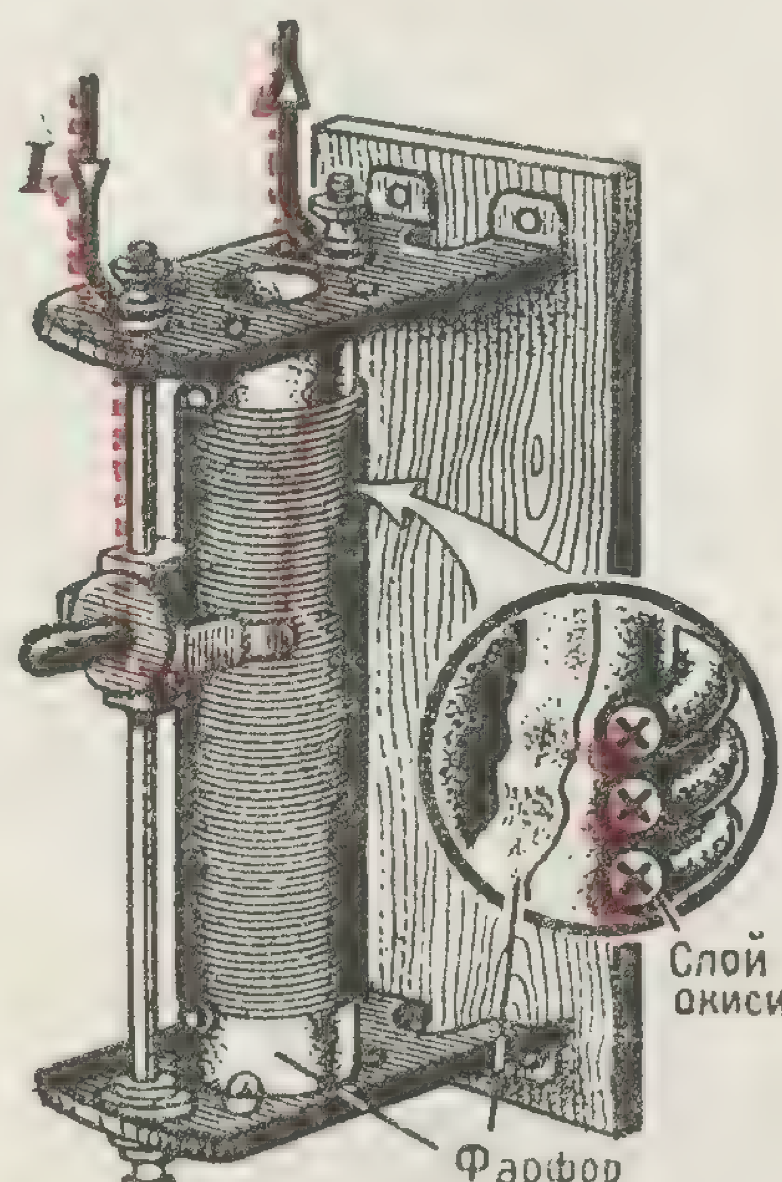
РЫЧАЖНЫЕ РЕОСТАТЫ



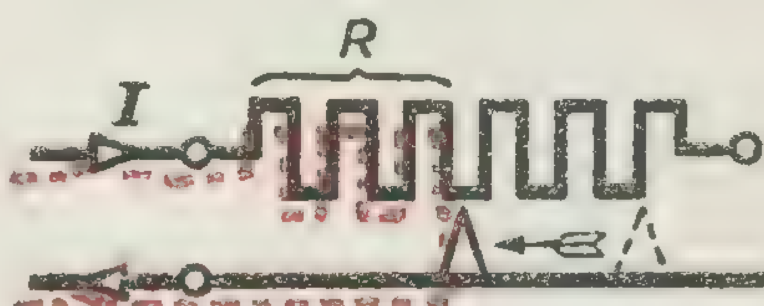
Водяной реостат



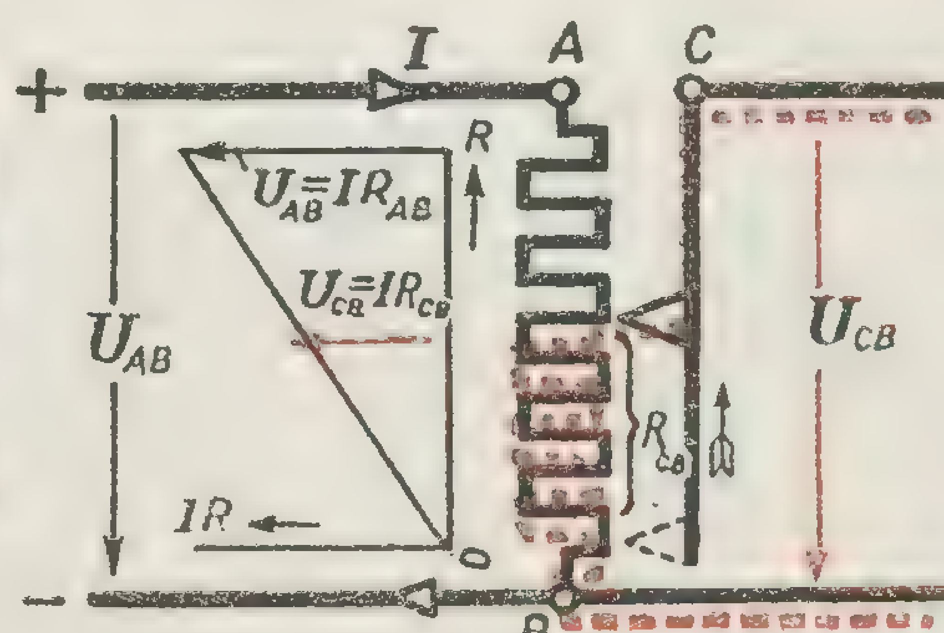
Ламповый реостат



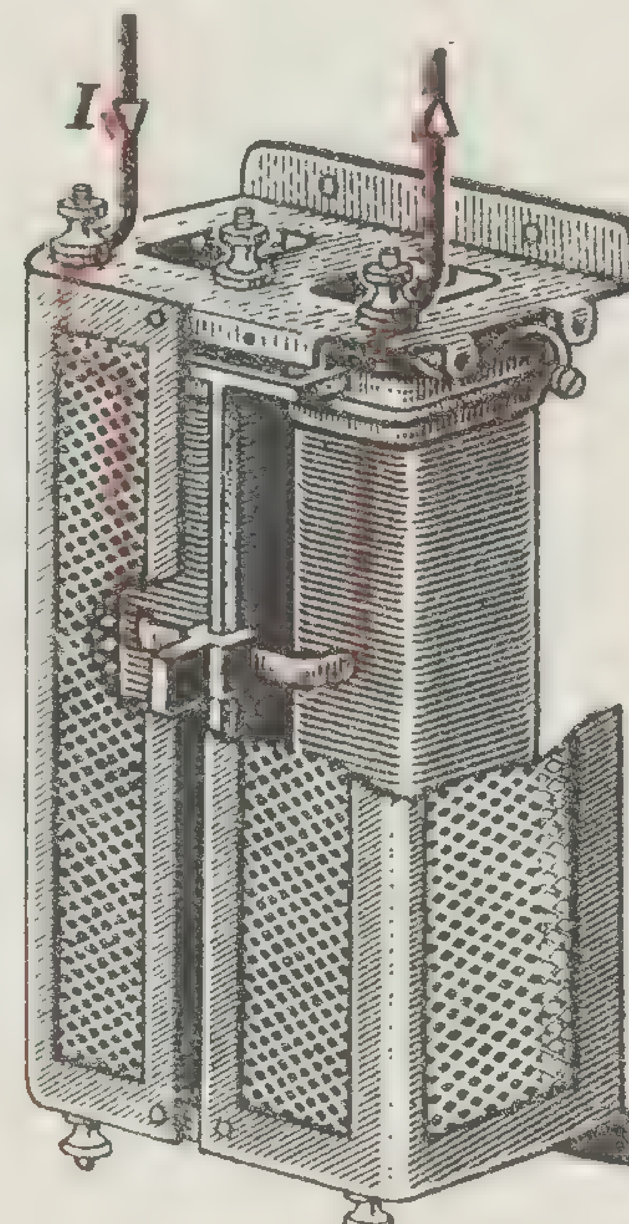
Одинарный



Применение в качестве переменного сопротивления



Применение в качестве делителя напряжения



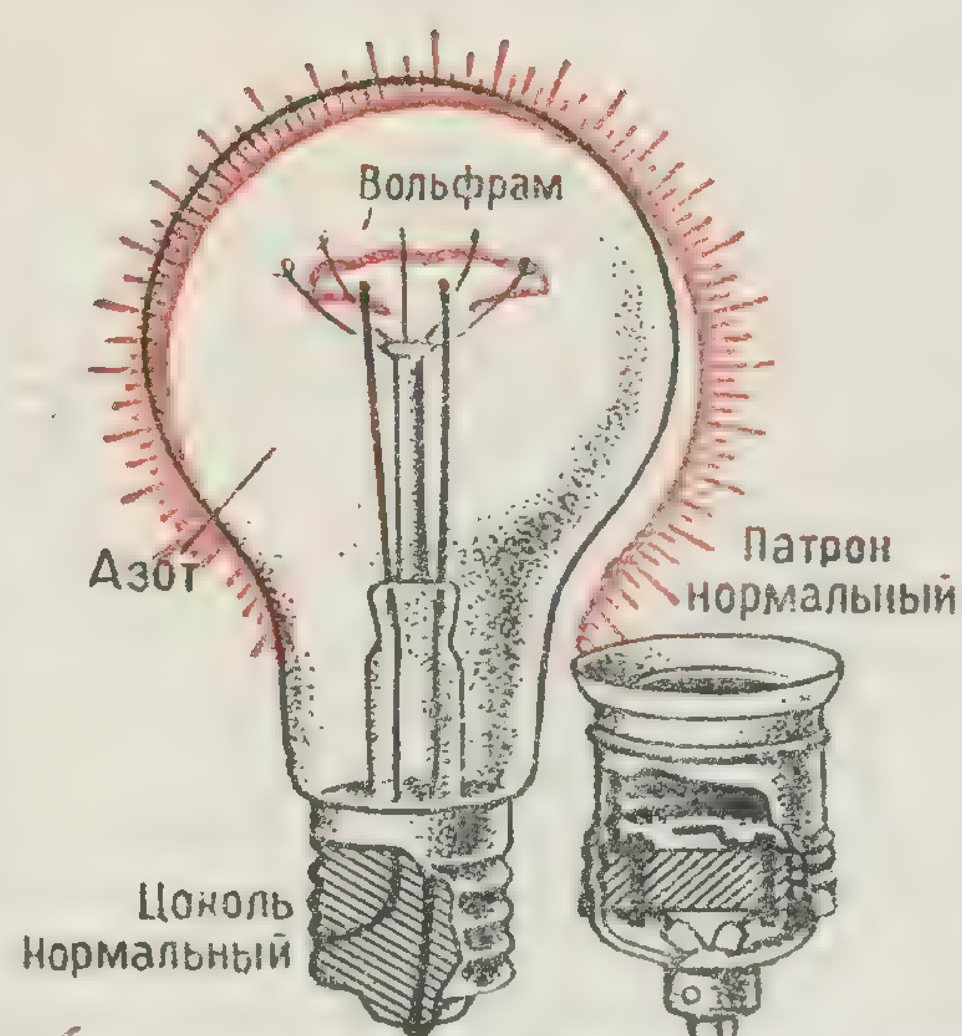
Двойной

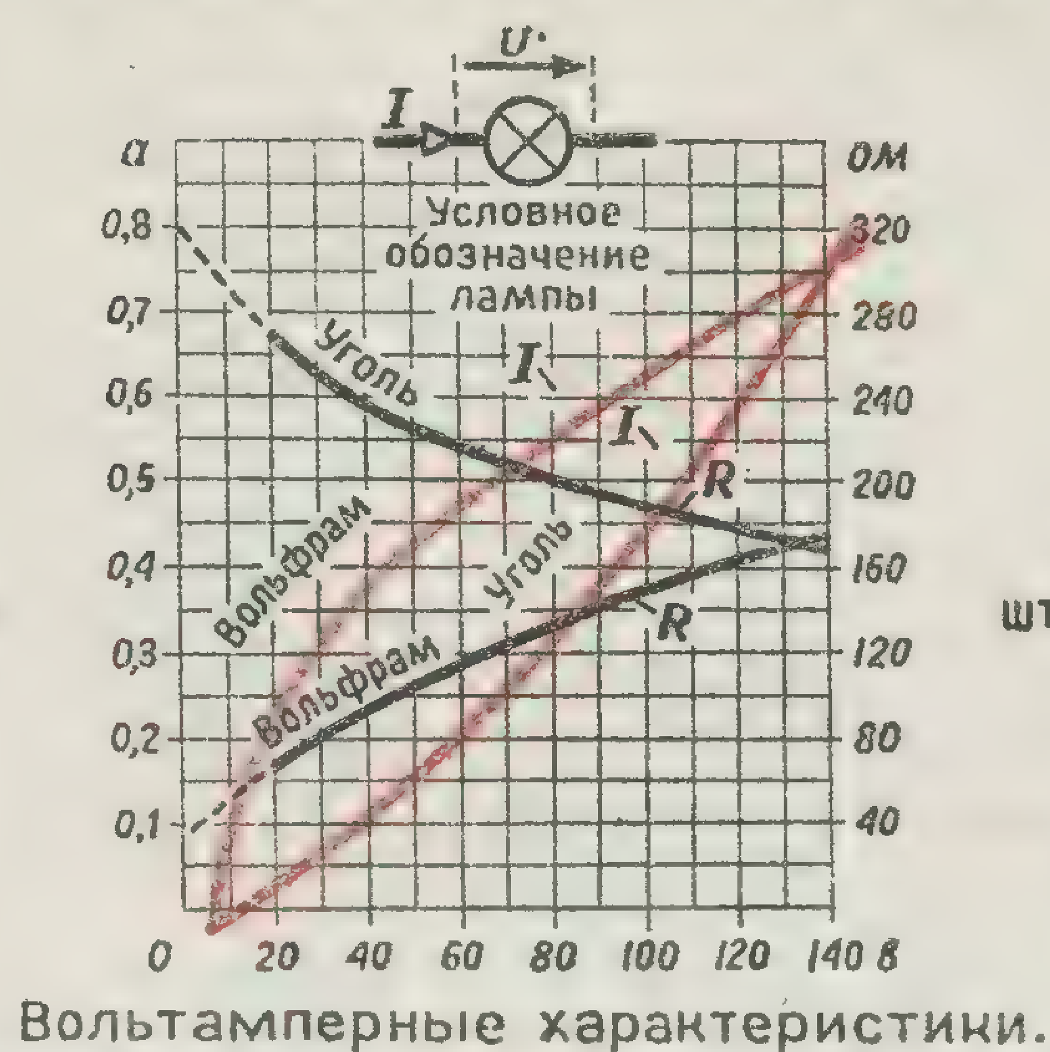
РЕОСТАТЫ СО СКОЛЬЗЯЩИМ КОНТАКТОМ

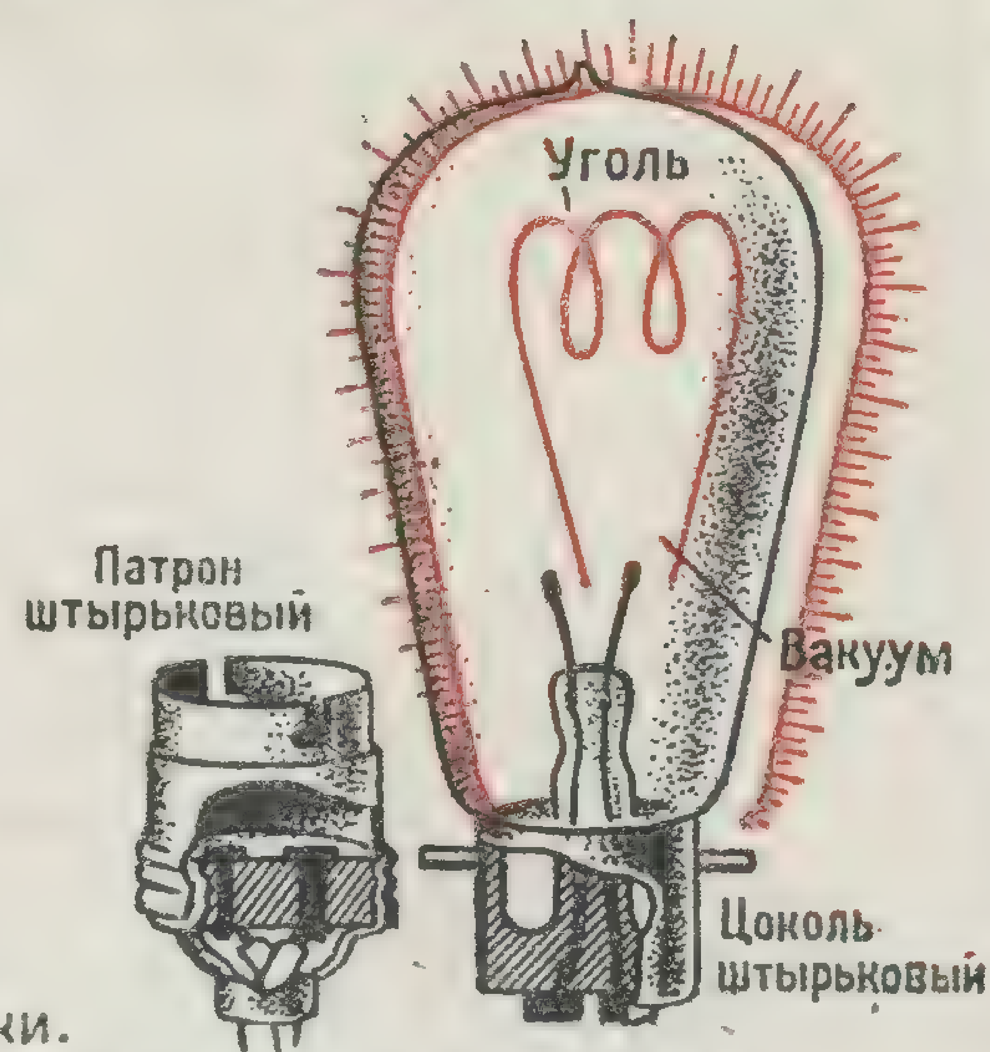
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

НЕЛИНЕЙНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

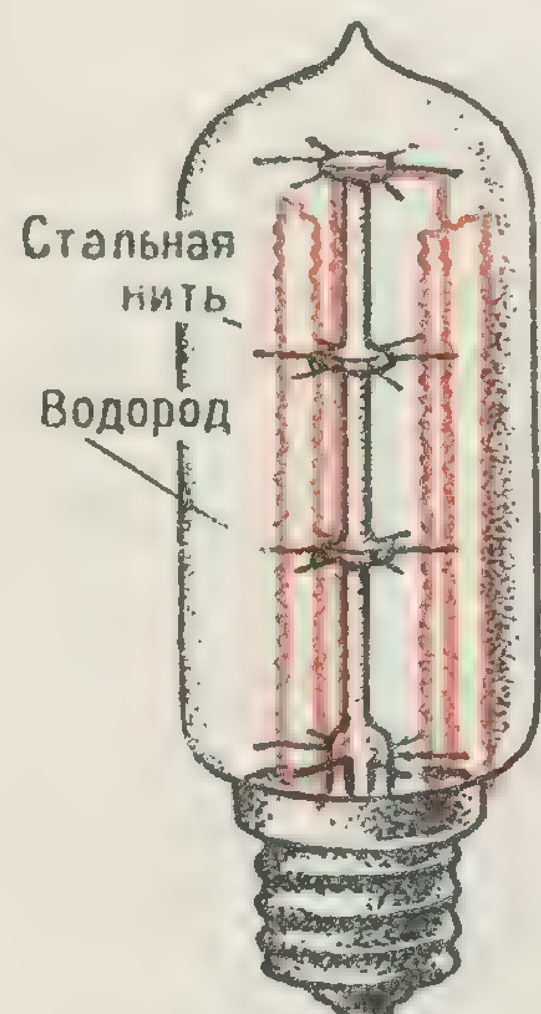






Лампа с вольфрамовой нитью
(Изобретена А.Н.Лодыгиным в 1906 г.)

Лампа с угольной нитью
(Изобретена А.Н.Лодыгиным в 1873 г.)



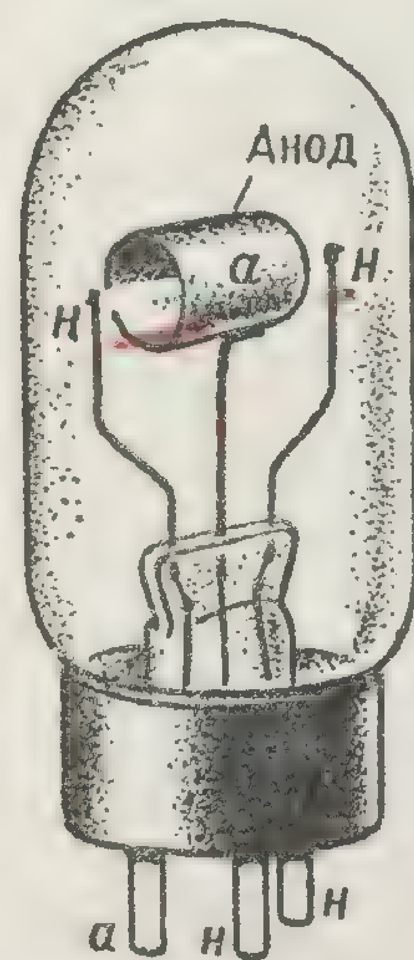




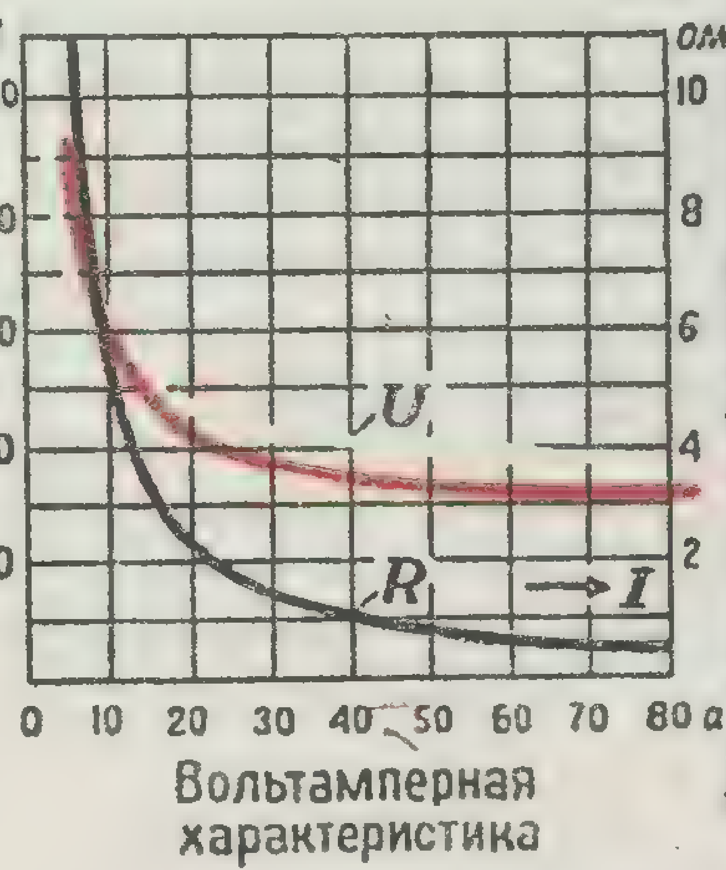


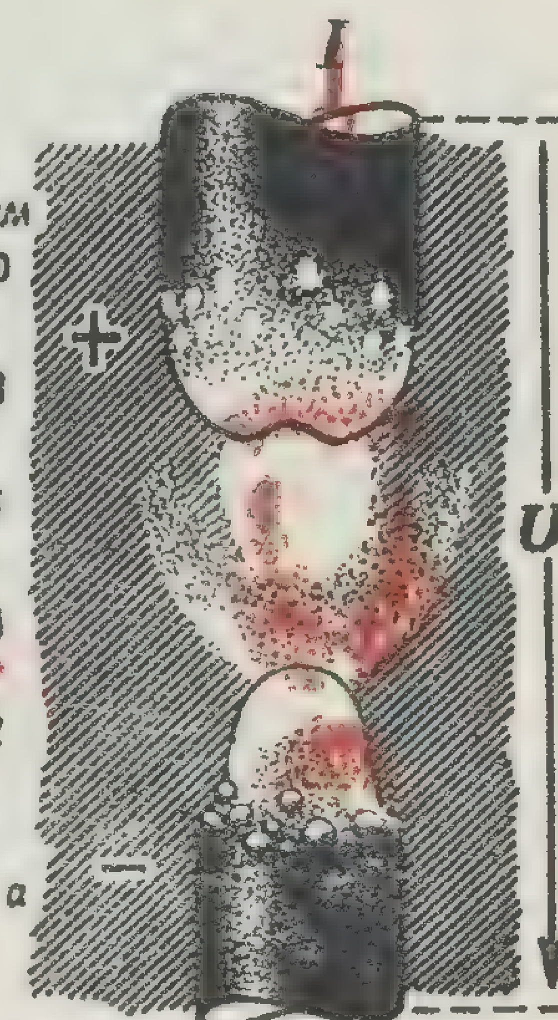
Стабилизатор тока (барретер)

Неоновая лампа









Двухэлектродная лампа (диод)

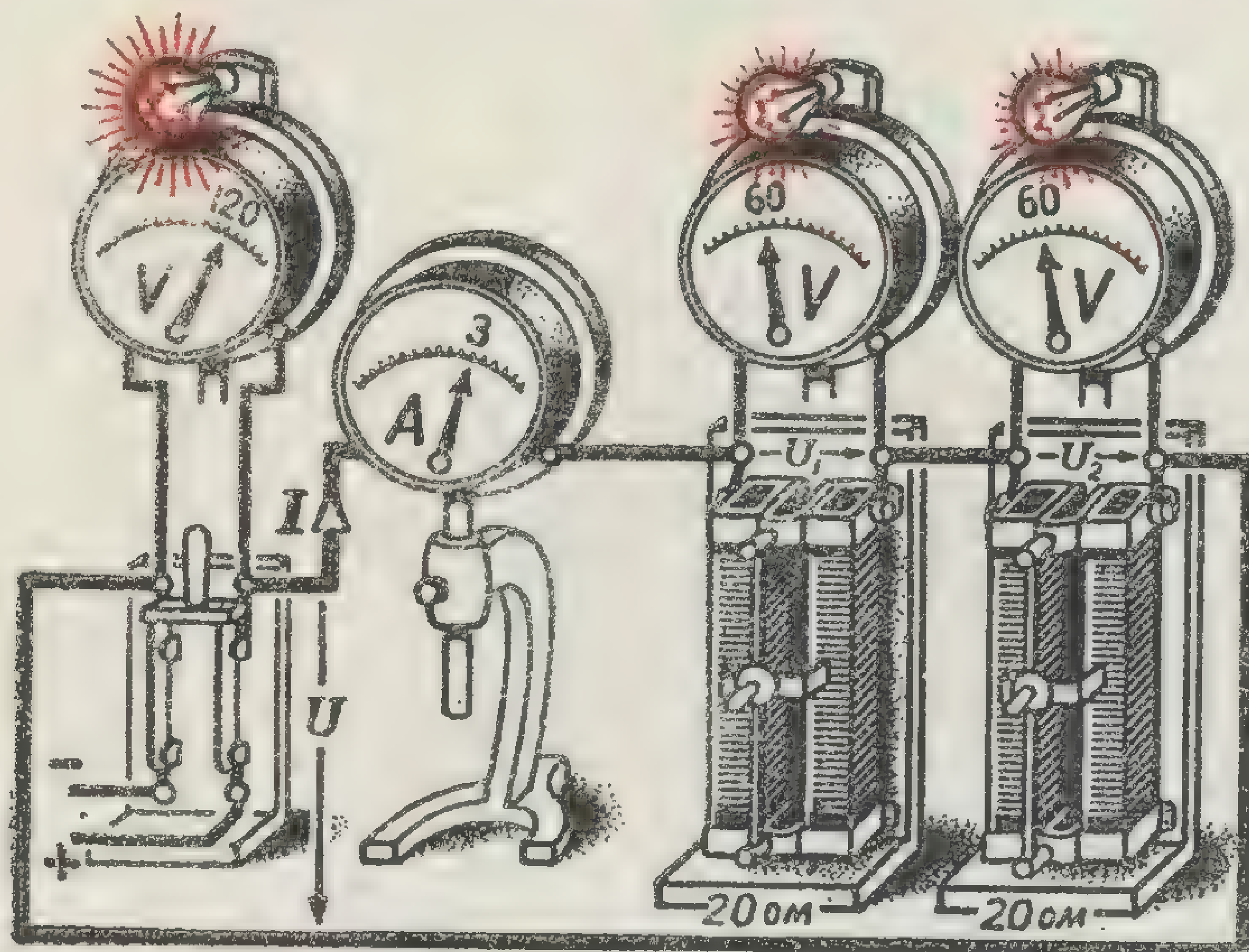
Электрическая дуга
(Открыта В.В.Петровым в 1802 г.)

ВЕЛИЧИНА НЕЛИНЕЙНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАВИСИТ ОТ ТОКА

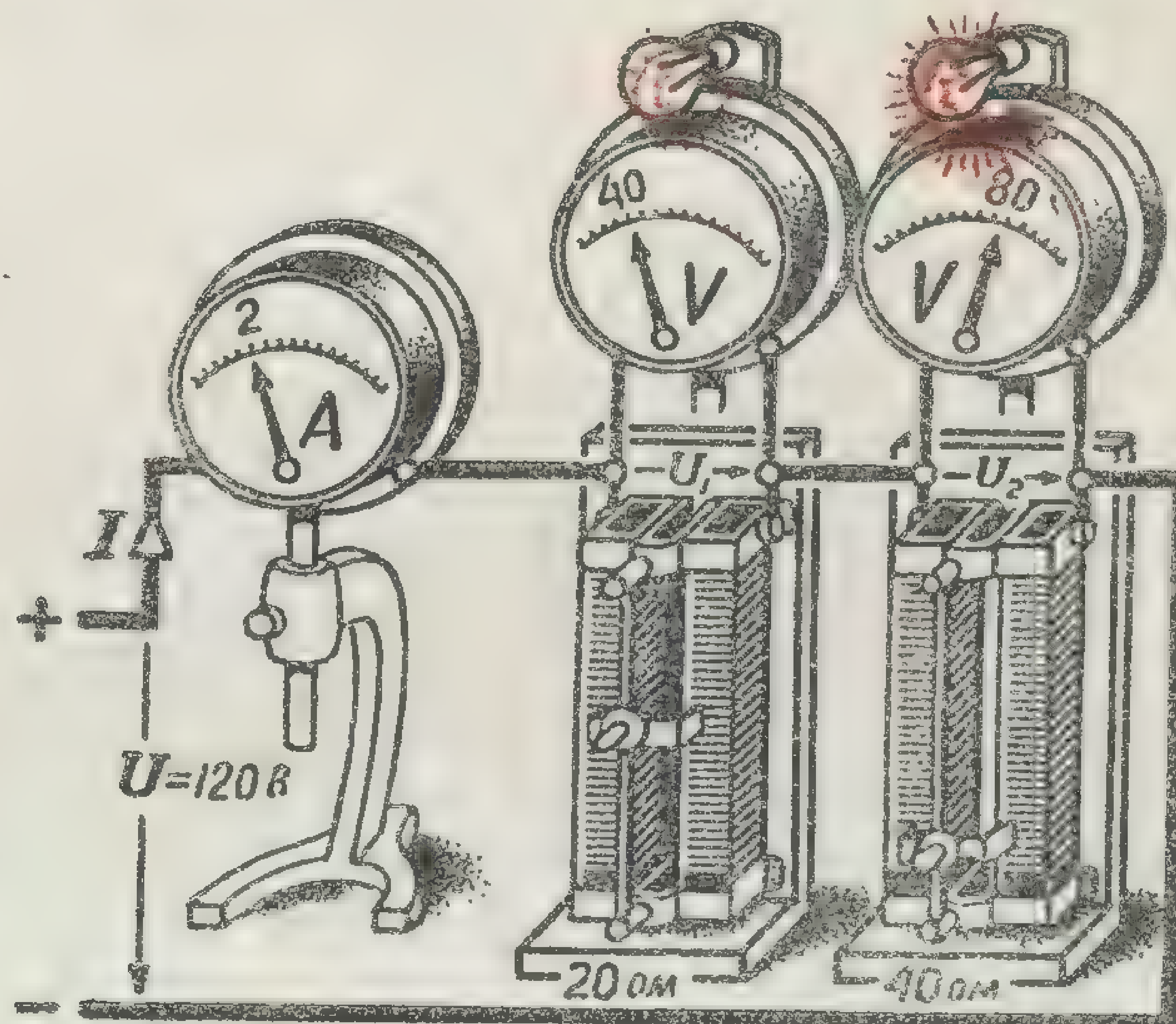
Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ
(ВСЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБТЕКАЮТСЯ ОДНИМ И ТЕМ ЖЕ ТОКОМ)

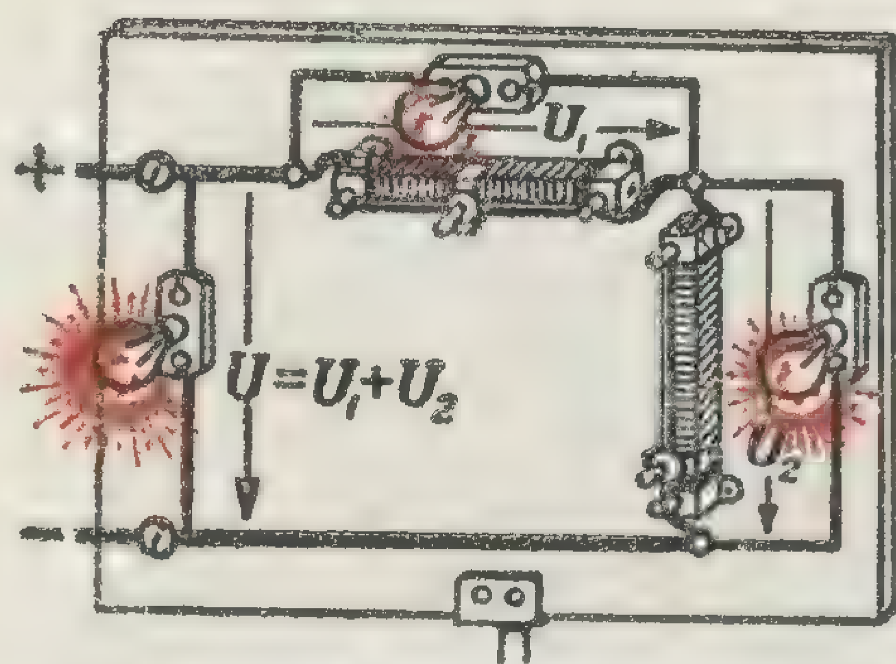


Сопротивления одинаковы

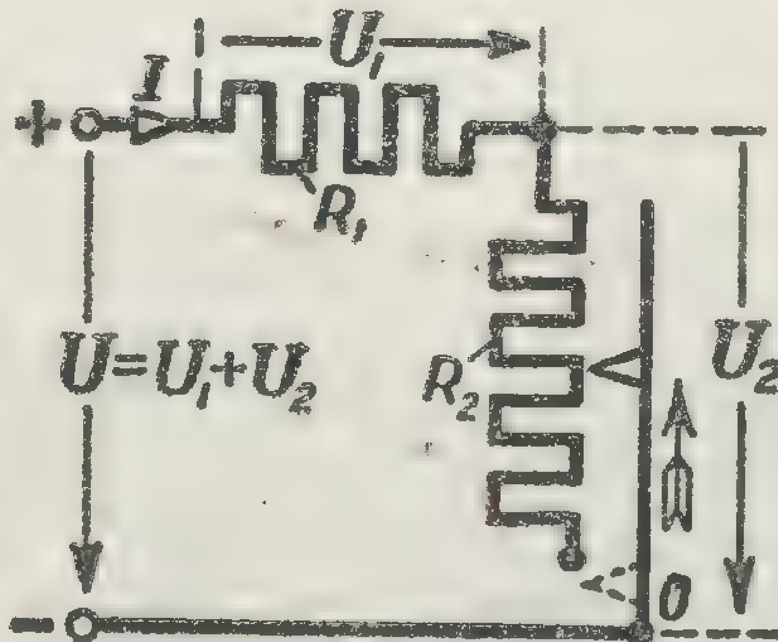


Сопротивления неодинаковы

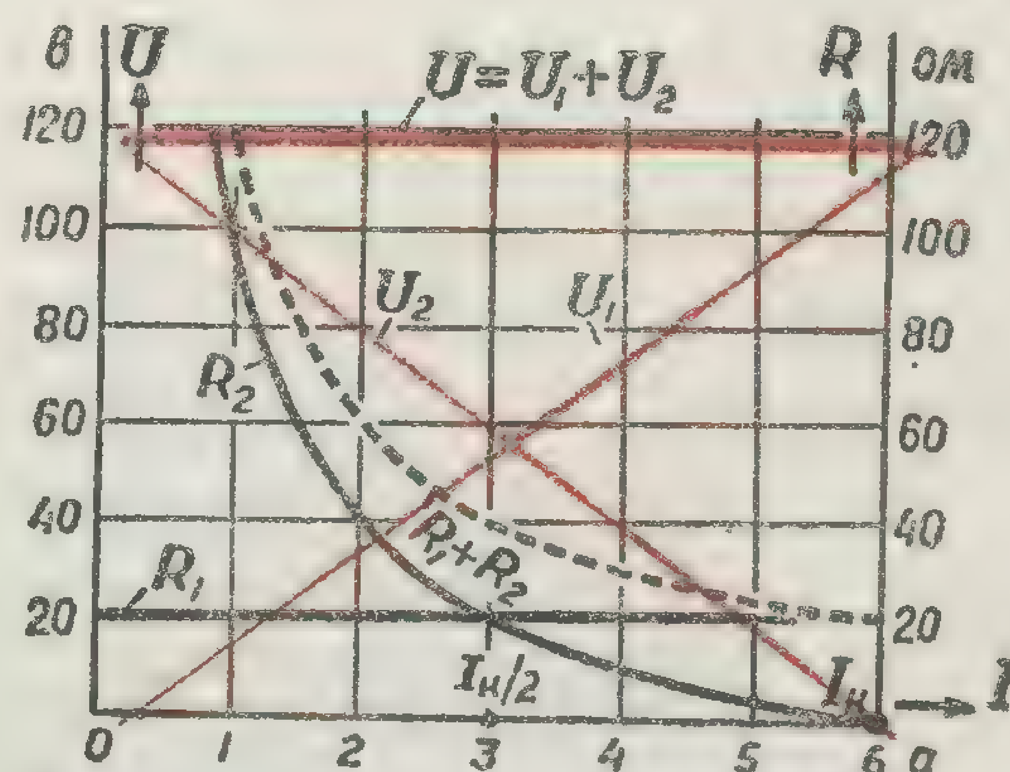
Последовательное соединение реостатов



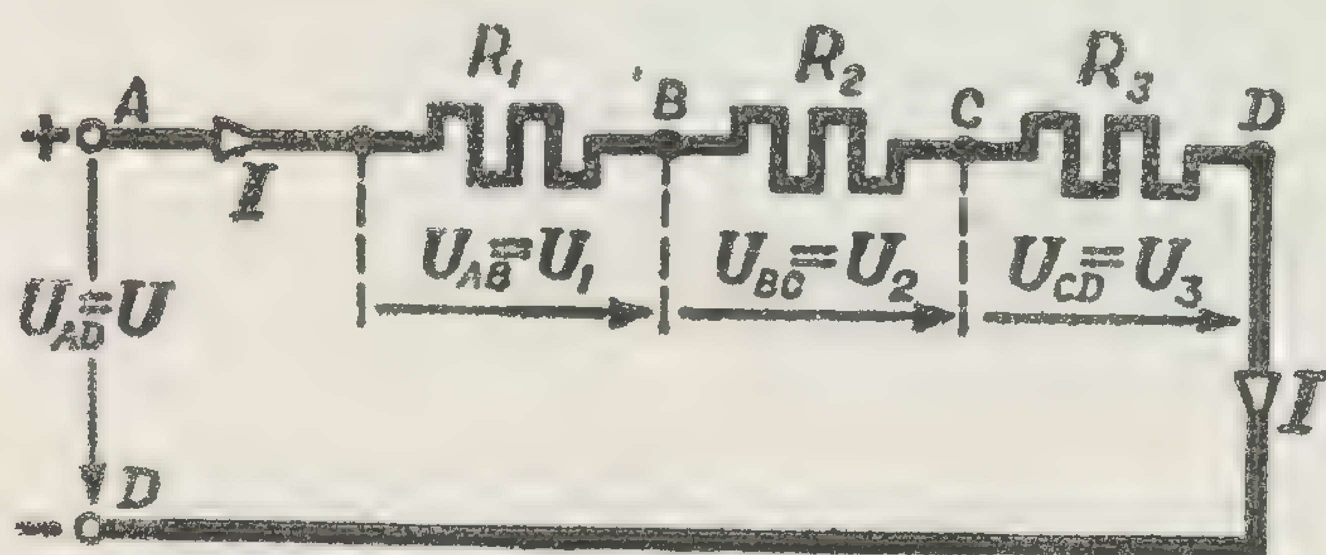
Распределение напряжения между участками последовательной цепи



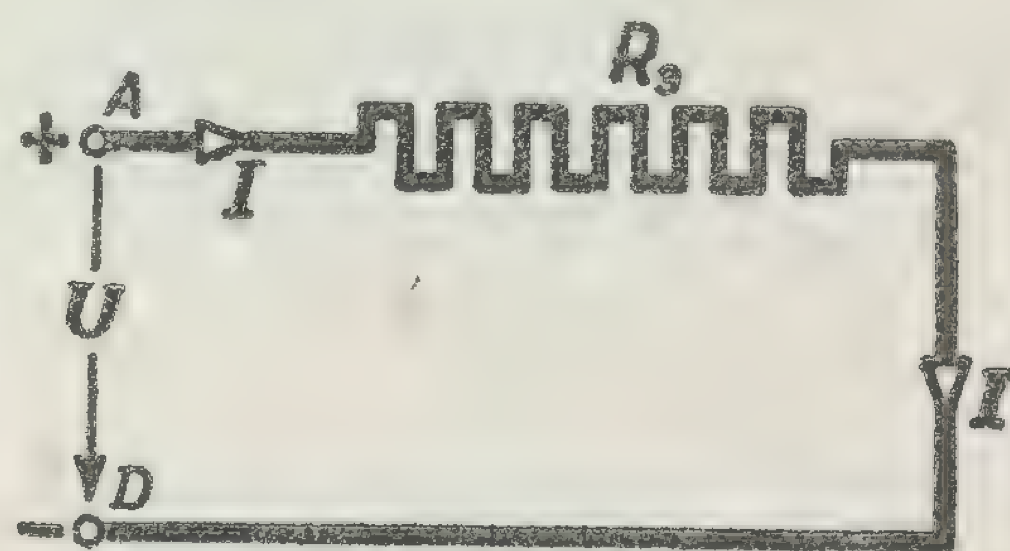
Изменение сопротивления одного из последовательно соединенных реостатов



Перераспределение напряжения при изменении сопротивления одного из реостатов



Последовательное соединение сопротивлений



Эквивалентное сопротивление

$R_э = R_1 + R_2 + \dots = \Sigma R_к$ ом

Эквивалентное (общее) сопротивление

$U = U_1 + U_2 + \dots = \Sigma U_к$ в

Общее напряжение

$U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3$

Распределение напряжения между отдельными сопротивлениями

$R_э = nR_1$ ом $\quad U_1 = \frac{U}{n}$ в

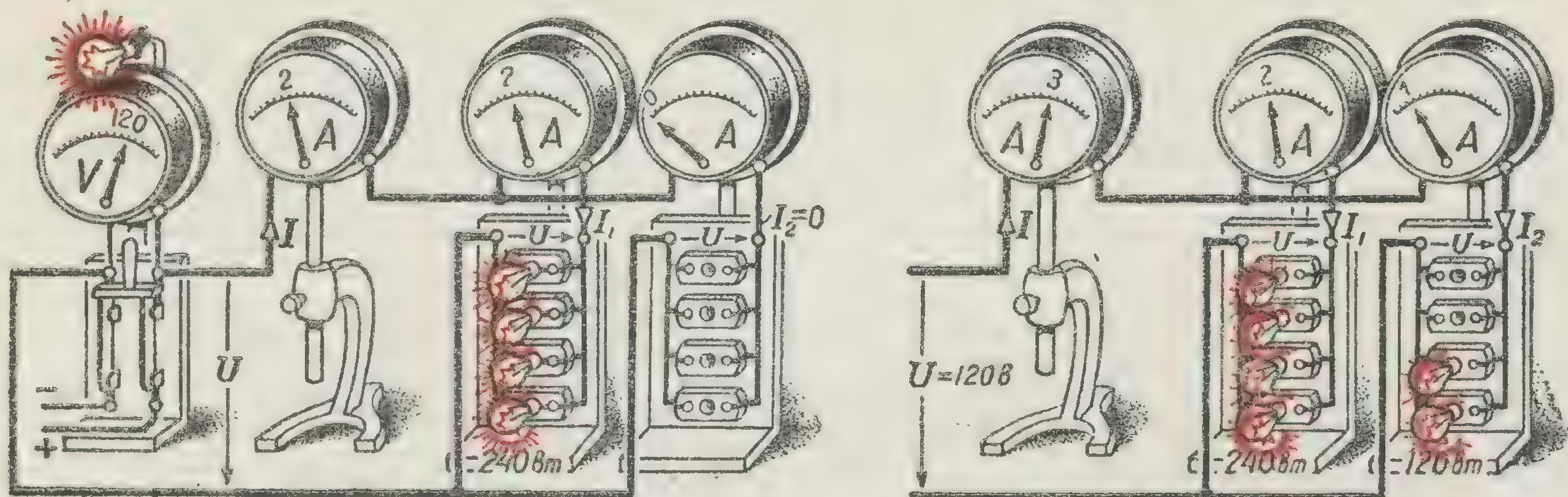
Частный случай n одинаковых сопротивлений

При последовательном соединении проводников эквивалентное (общее) сопротивление цепи равно сумме отдельных сопротивлений. Общее напряжение равно сумме напряжений на зажимах отдельных участков и распределяется прямо пропорционально сопротивлениям этих участков

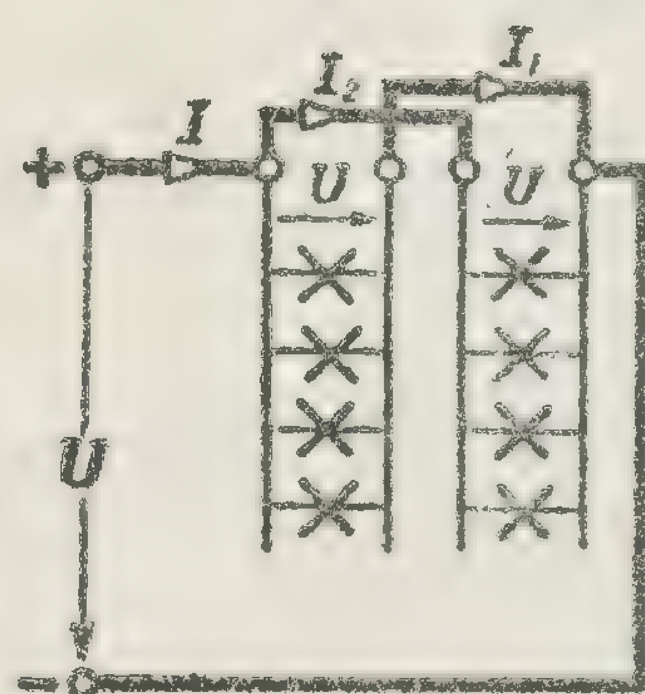
Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

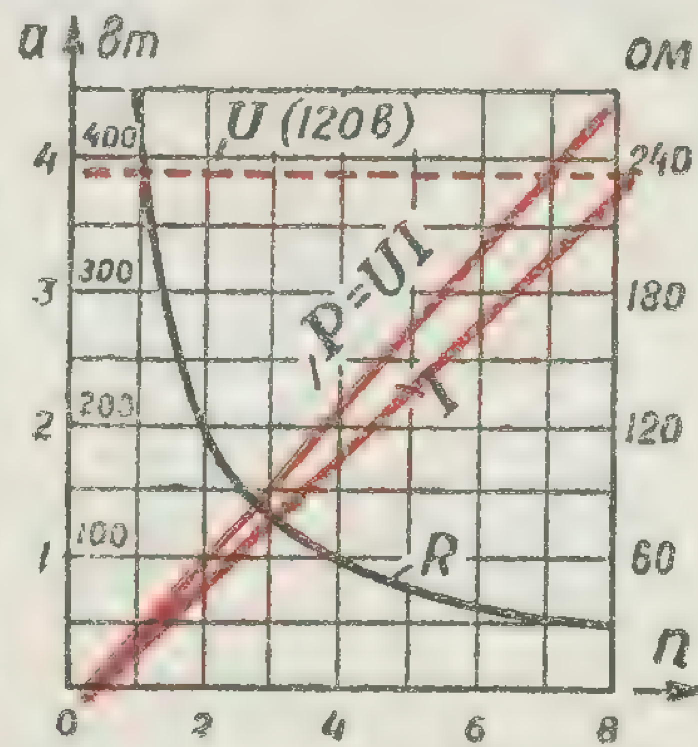
ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ
(ПРИСОЕДИНЕНИЕ К ОДНОМУ И ТОМУ ЖЕ НАПРЯЖЕНИЮ)



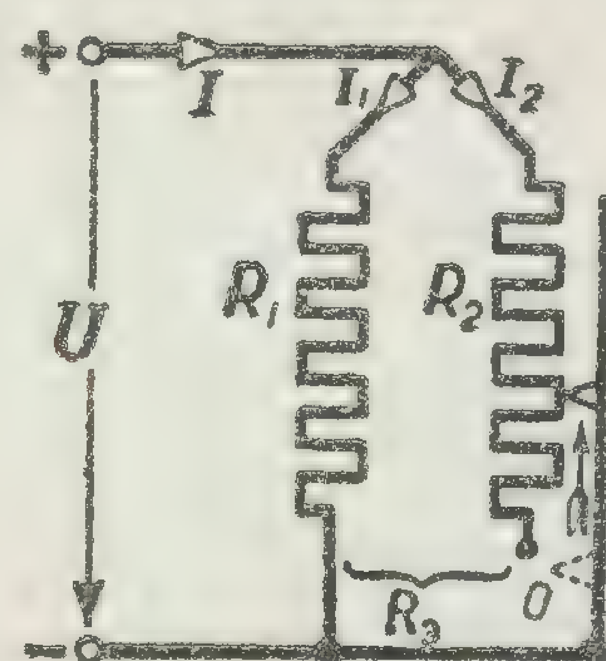
Параллельное соединение ламповых реостатов



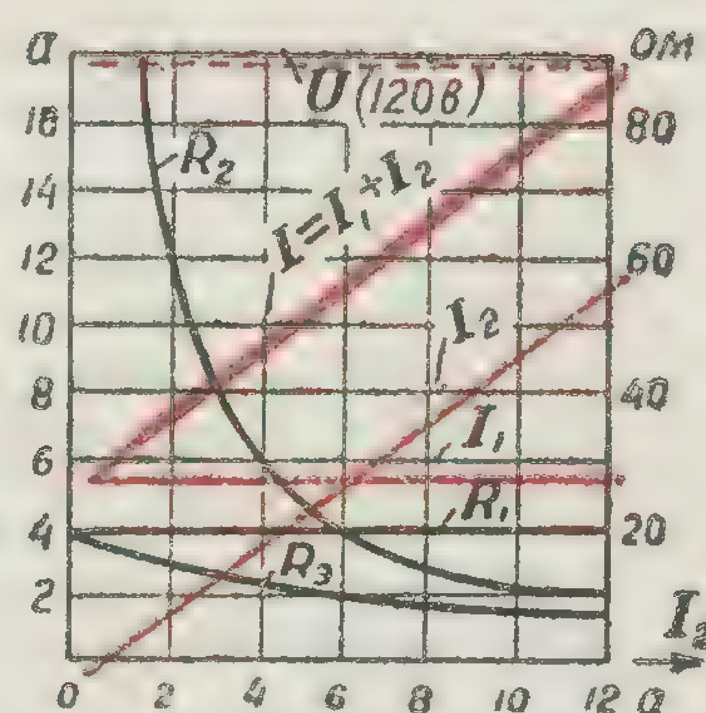
Параллельное соединение одинаковых ламп



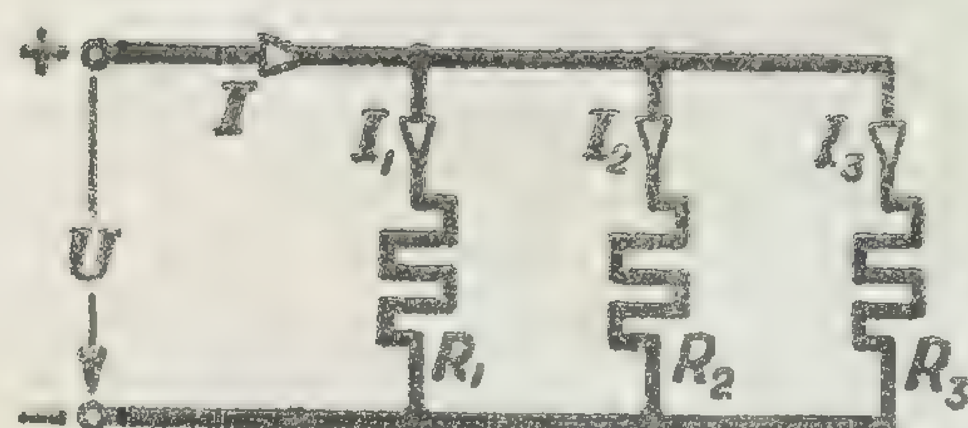
Изменение тока, мощности и общего сопротивления с увеличением числа (n) ламп



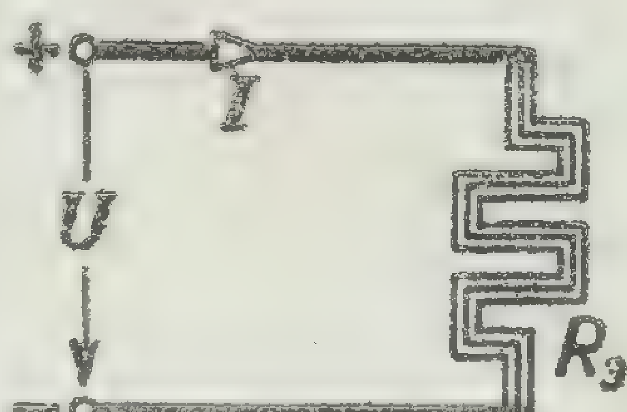
Изменение сопротивления одного из параллельно соединенных реостатов



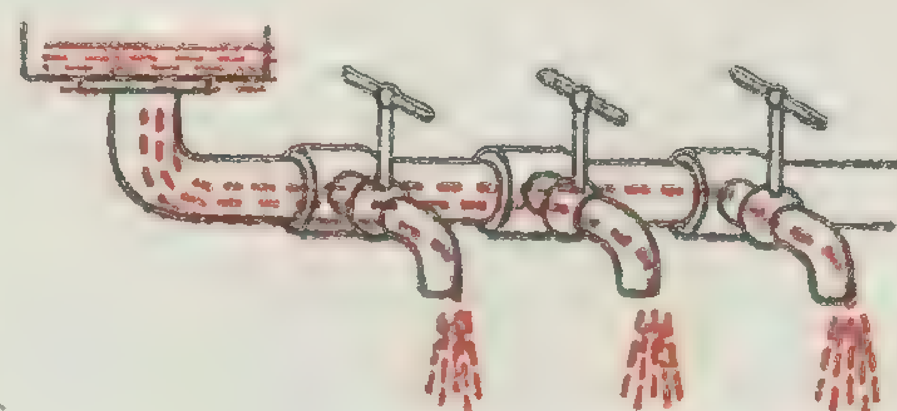
Распределение тока в цепи при изменении сопротивления одного из реостатов



Параллельное соединение сопротивлений



Эквивалентное сопротивление



Гидравлическая аналогия

$$\frac{1}{R_э}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots=\Sigma\frac{1}{R_K}\ \frac{1}{ом}$$

Эквивалентная (общая) проводимость

$$I=I_1+I_2+\cdots=\Sigma I_K\ а$$

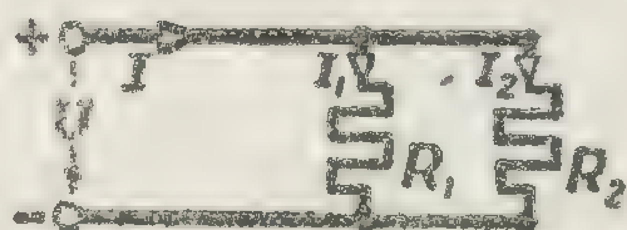
Общий ток

$$I_1:I_2:I_3=\frac{1}{R_1}:\frac{1}{R_2}:\frac{1}{R_3}$$

Распределение тока между параллельными ветвями

$$R_э=\frac{R_1}{n}\ ом \qquad I=nI_1\ а$$

Частный случай n одинаковых сопротивлений



$$R_э=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}\ ом \qquad I_1=I\frac{R_э}{R_1}=I\frac{R_2}{R_1+R_2}\ а \qquad I_2=I\frac{R_э}{R_2}=I\frac{R_1}{R_1+R_2}\ а$$

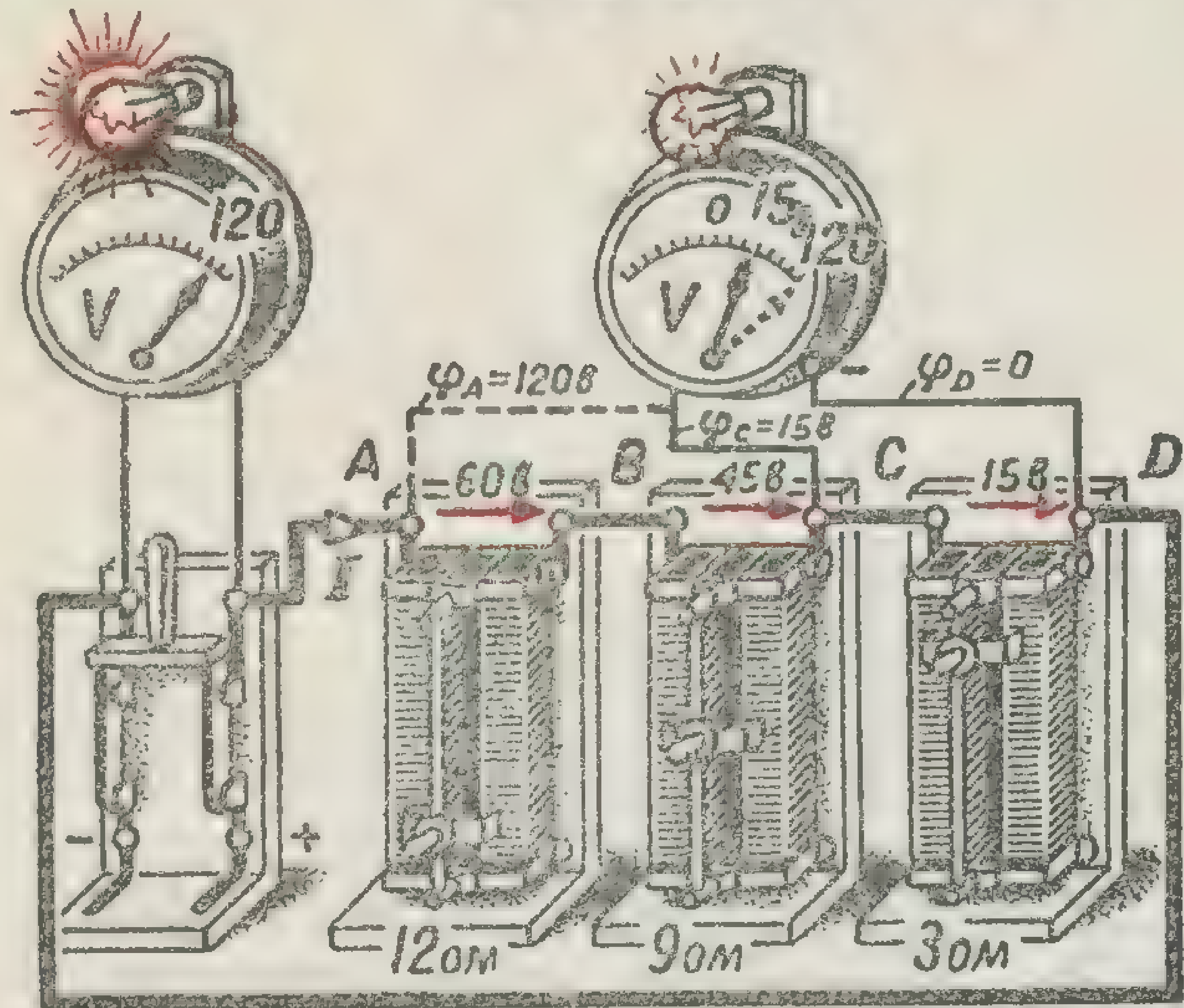
Частный случай параллельного соединения двух произвольных сопротивлений

При параллельном соединении проводников
эквивалентная (общая) проводимость цепи равна сумме отдельных проводимостей
Общий ток равен сумме токов отдельных ветвей
и распределяется обратно пропорционально сопротивлениям этих ветвей

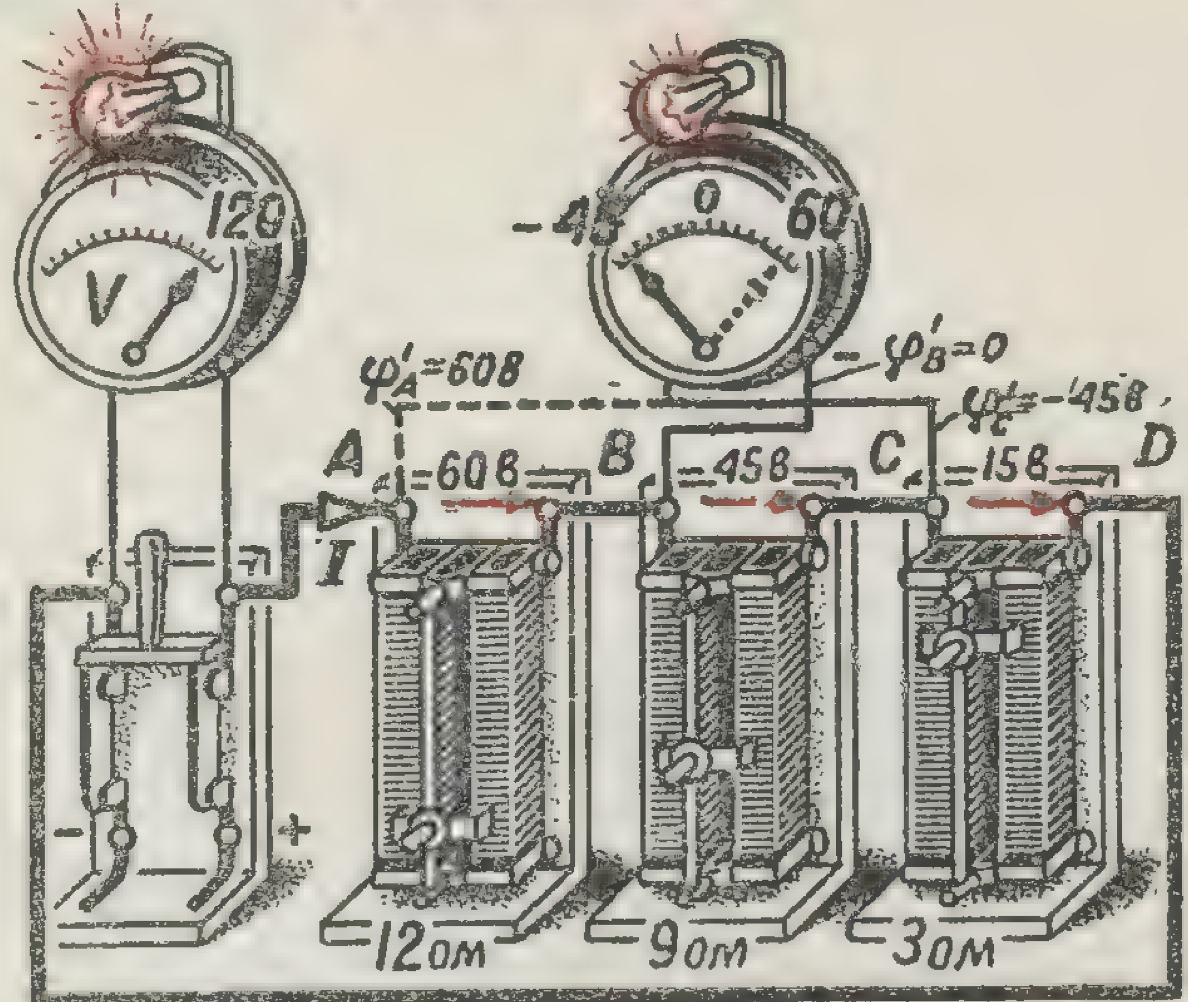
Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ГРАФИК ПОТЕНЦИАЛА

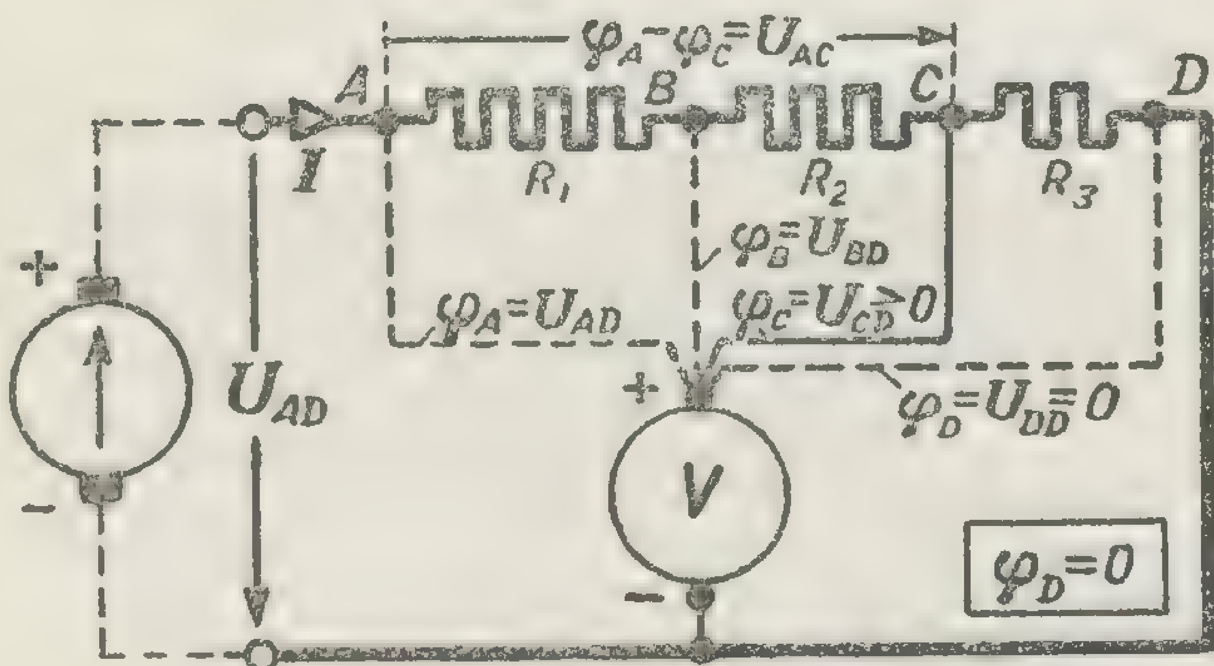


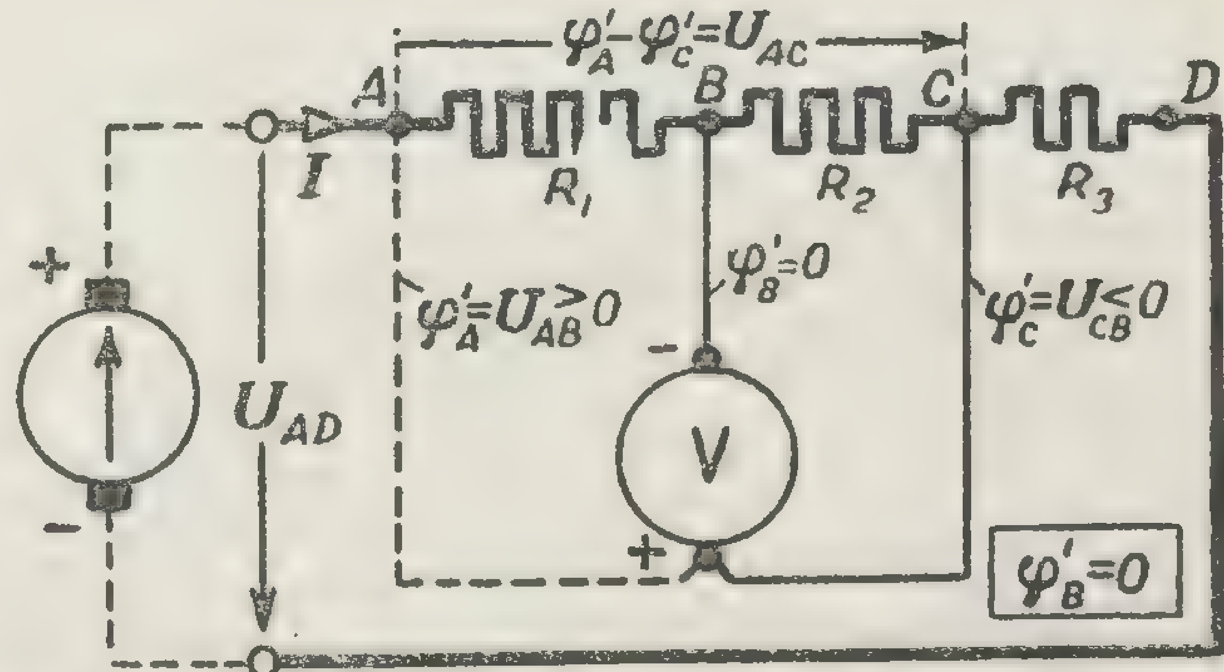
Минус вольтметра присоединен к исходной точке *D*, потенциал которой принят равным нулю



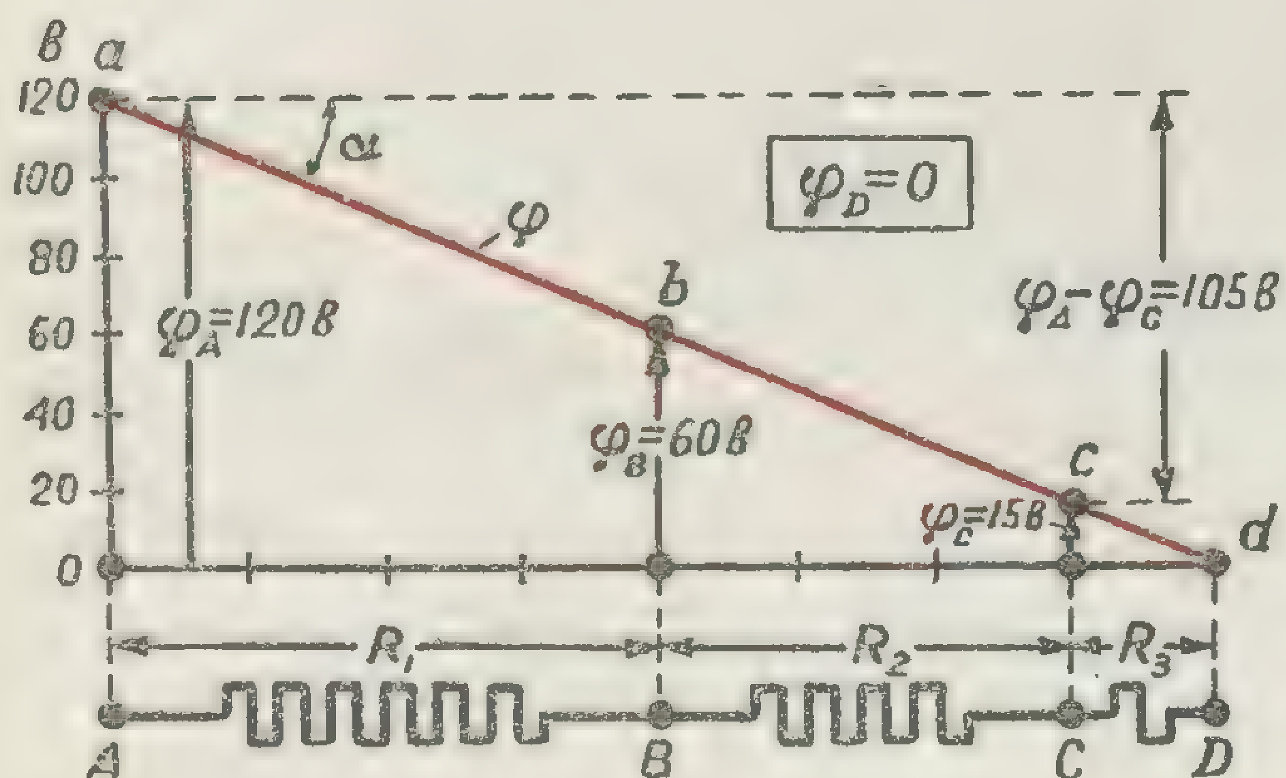
Минус вольтметра присоединен к исходной точке *B*, потенциал которой принят равным нулю

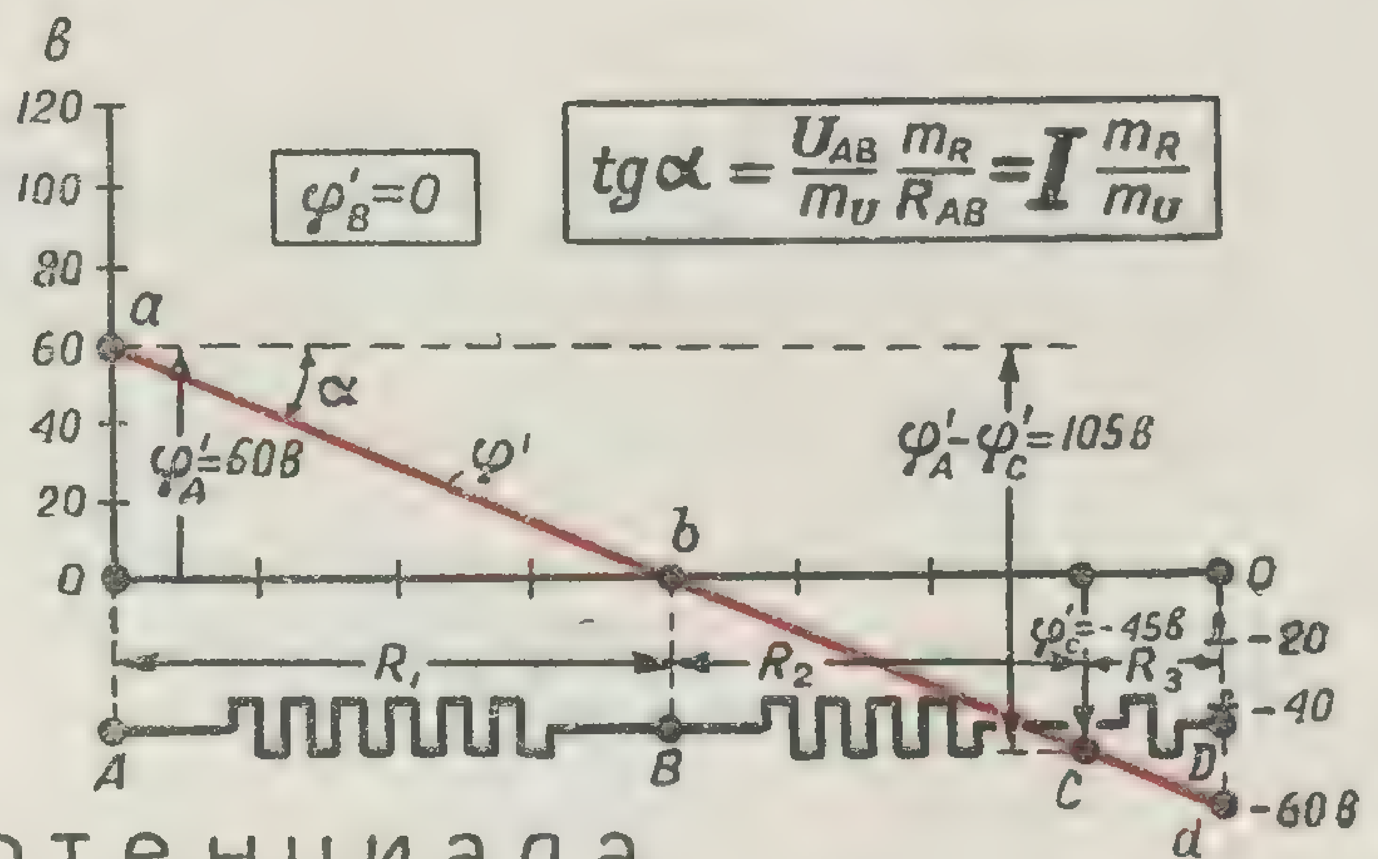
ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ





Схемы соединения



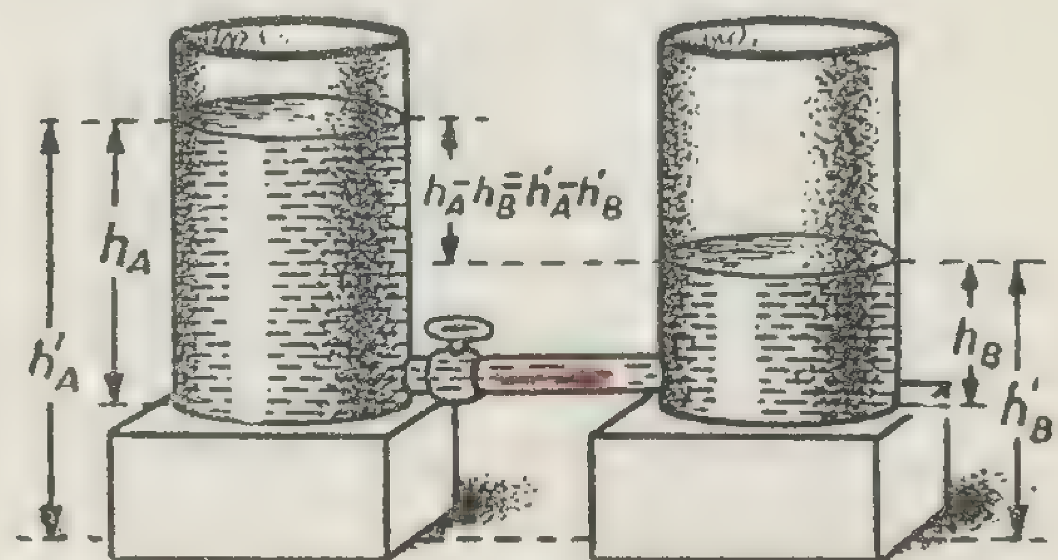


Графики потенциала

$$I_{AB}=\frac{\varphi_A-\varphi_B}{R_{AB}}\quad a$$

ЗАКОН ОМА

Электрический ток в проводнике (при отсутствии положительной э.д.с.) направлен от высшего потенциала к низшему

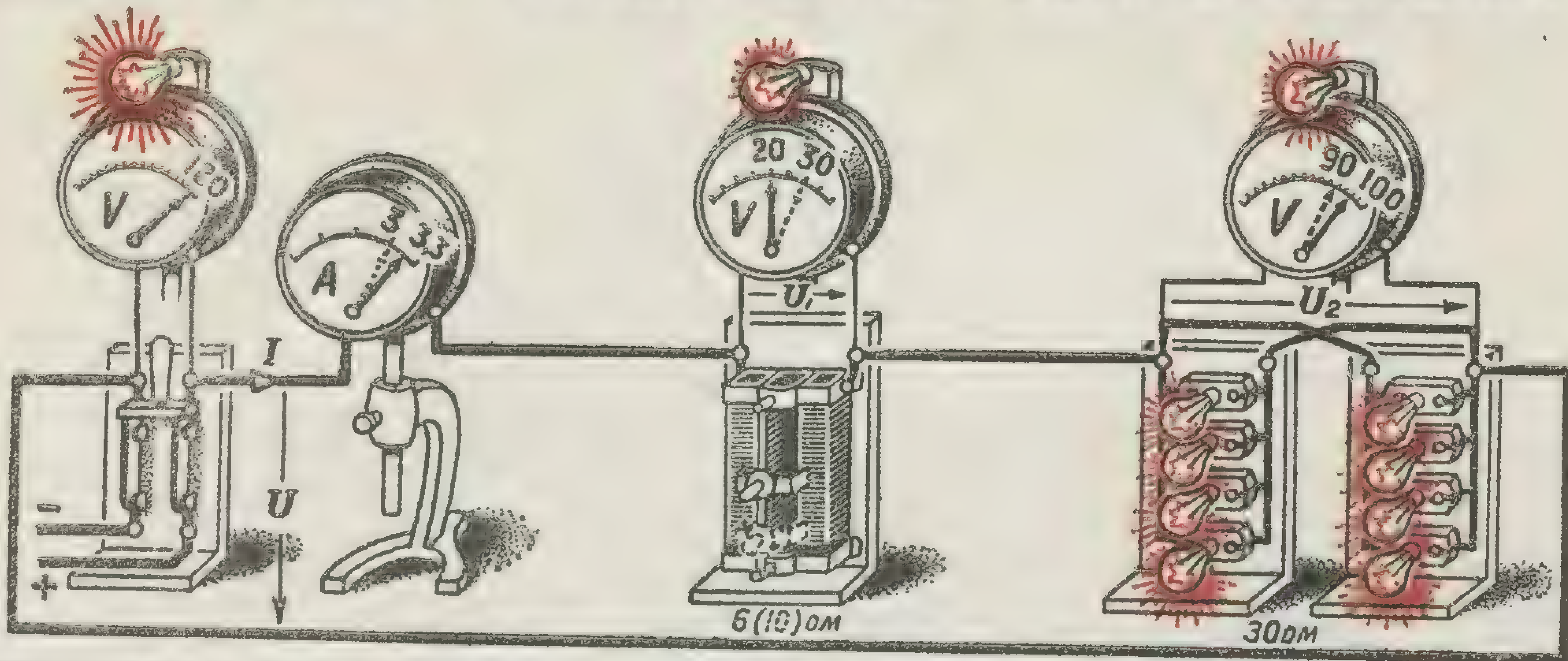


Гидравлическая аналогия

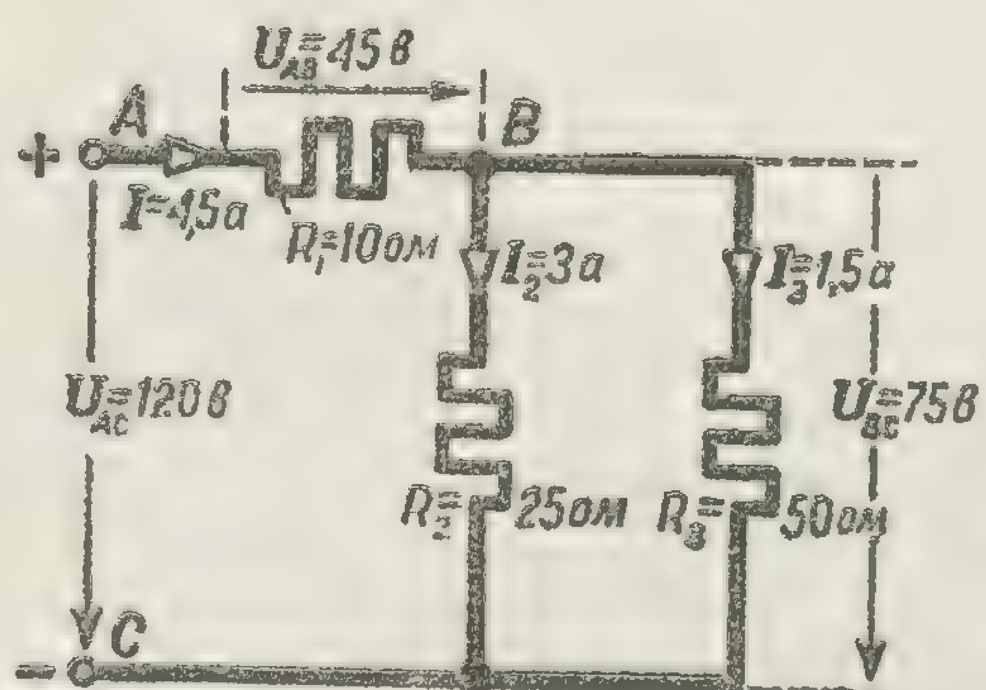
Э.И.Расовский

Худ А Меньшиков

СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ



Последовательное соединение реостата с параллельно включенными лампами



Смешанное соединение трех сопротивлений

$$R=R_1+\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}\ \text{ом}$$

Общее сопротивление.

$$I=\frac{U}{R};\ I_2=I\frac{R_3}{R_2+R_3};\ I_3=I\frac{R_2}{R_2+R_3}=I-I_2\quad a$$

Токи.

$$U_{BC}=U_{BA}+U_{AC}=U_{AC}-IR_1\quad в$$

Напряжение

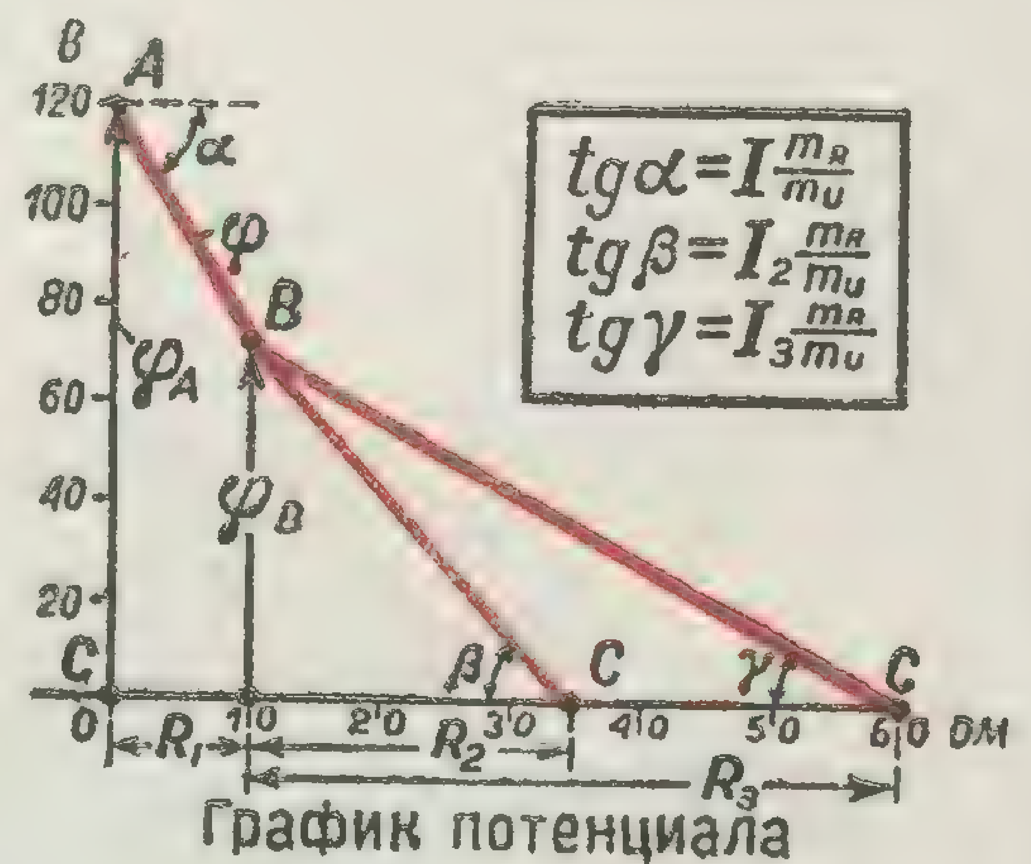
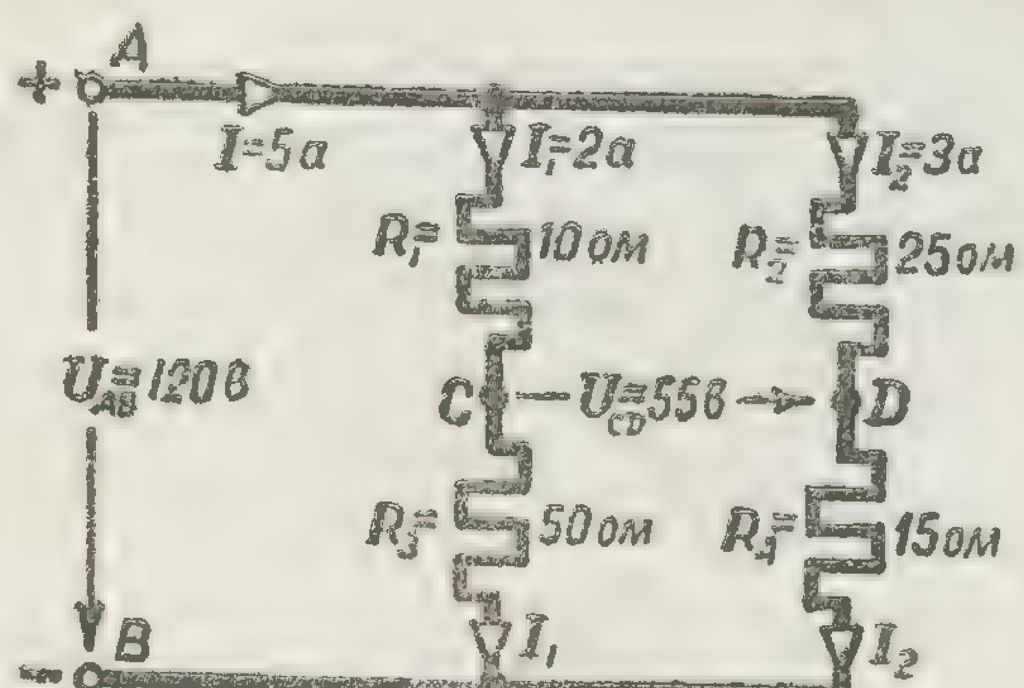


График потенциала



Параллельное соединение двух ветвей

$$I_1=\frac{U}{R_1+R_3};\ I_2=\frac{U}{R_2+R_4};\ I=I_1+I_2\quad a$$

Токи

$$U_{CD}=U_{CB}+U_{BD}=I_1R_3-I_2R_4$$

или

$$U_{CD}=U_{CA}+U_{AD}=-I_1R_1+I_2R_2\quad в$$

Напряжение

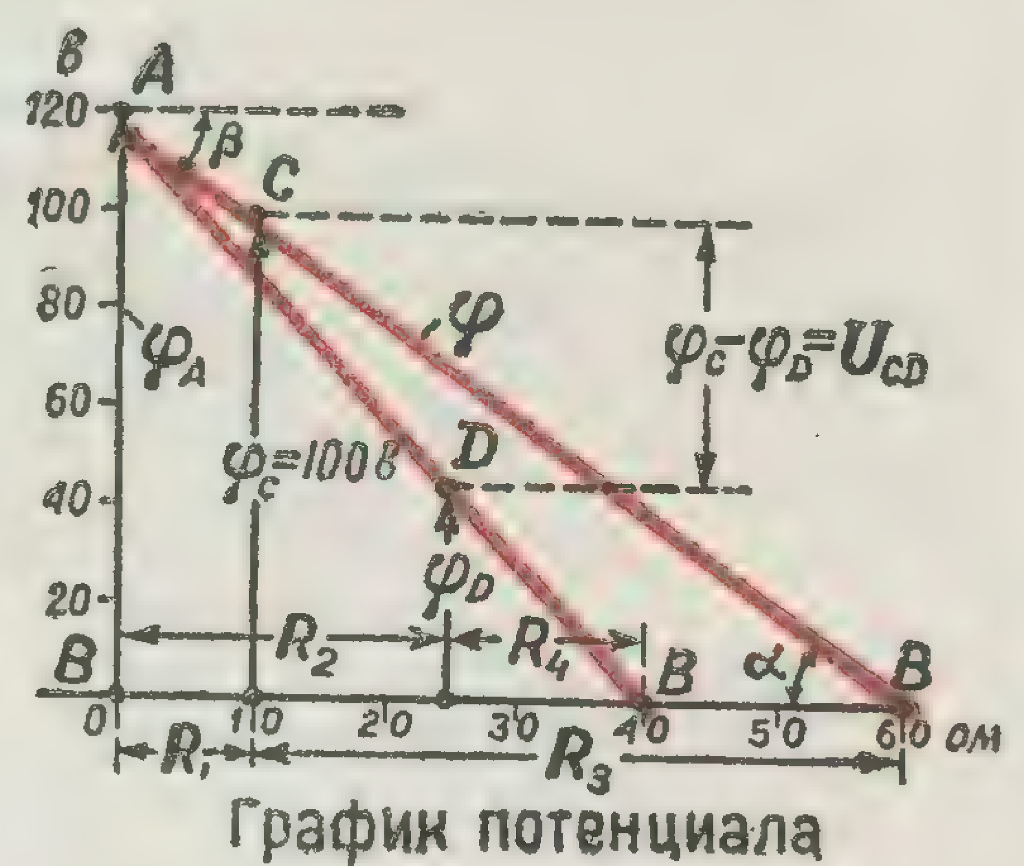
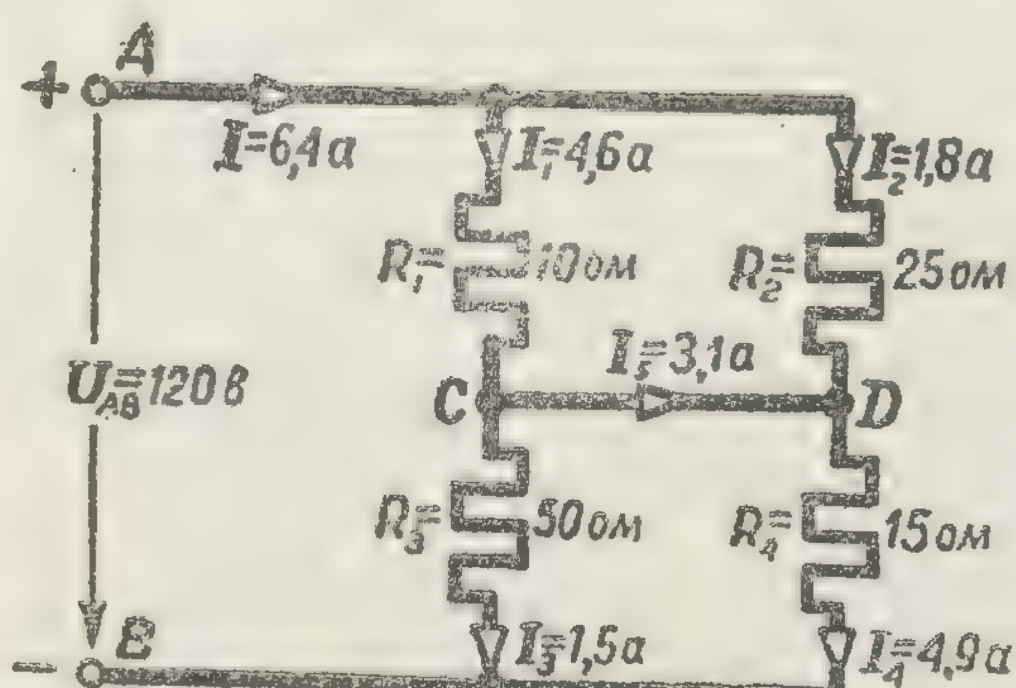


График потенциала



Последовательное соединение двух разветвленных участков

$$R=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}+\frac{R_3R_4}{R_3+R_4}\ \text{ом}$$

Общее сопротивление.

$$I=\frac{U}{R};\ I_1=I\frac{R_2}{R_1+R_2};$$
$$I_2=I\frac{R_1}{R_1+R_2}=I-I_1;$$
$$I_3=I\frac{R_4}{R_3+R_4};\ I_4=I-I_3;\quad a$$
$$I_5=I_1-I_3=I_4-I_2$$

Токи

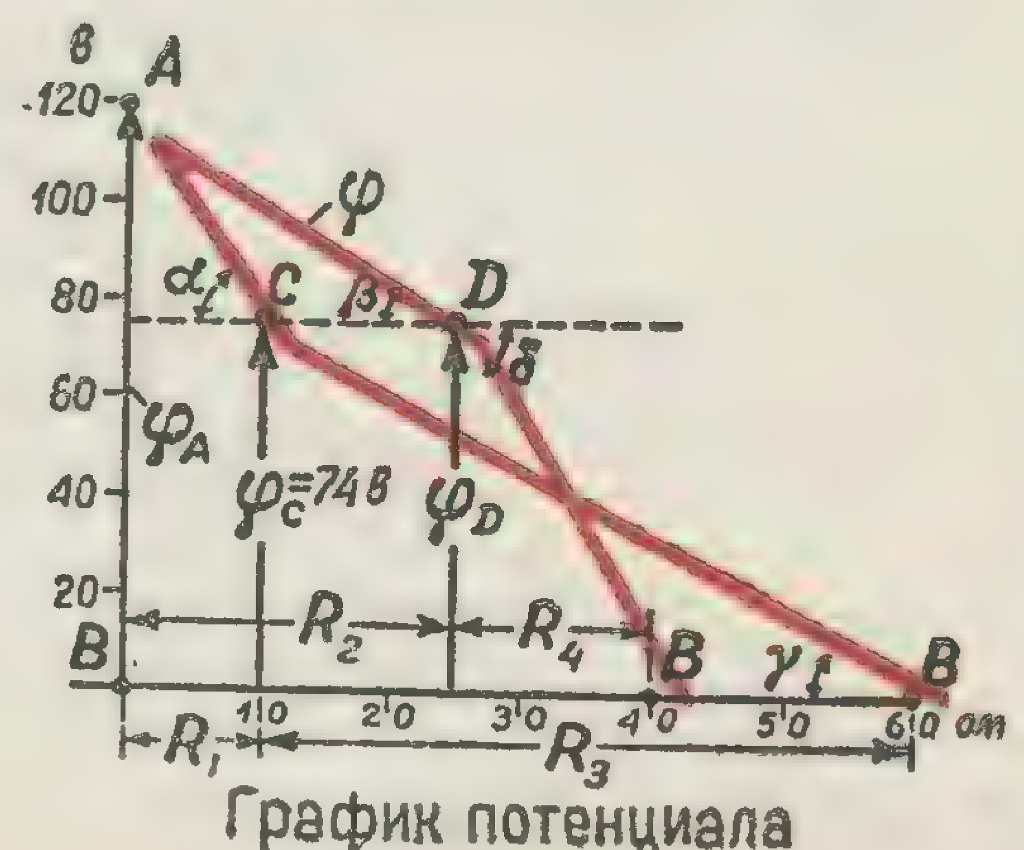
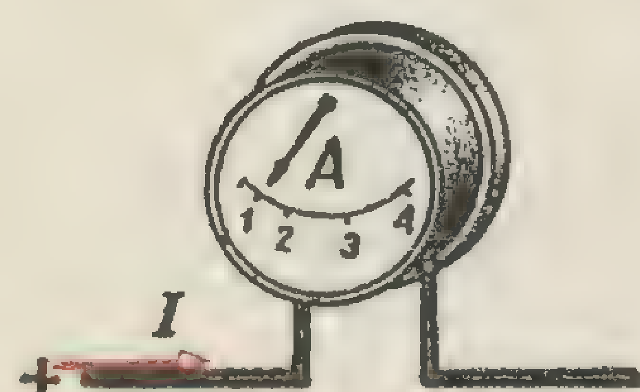


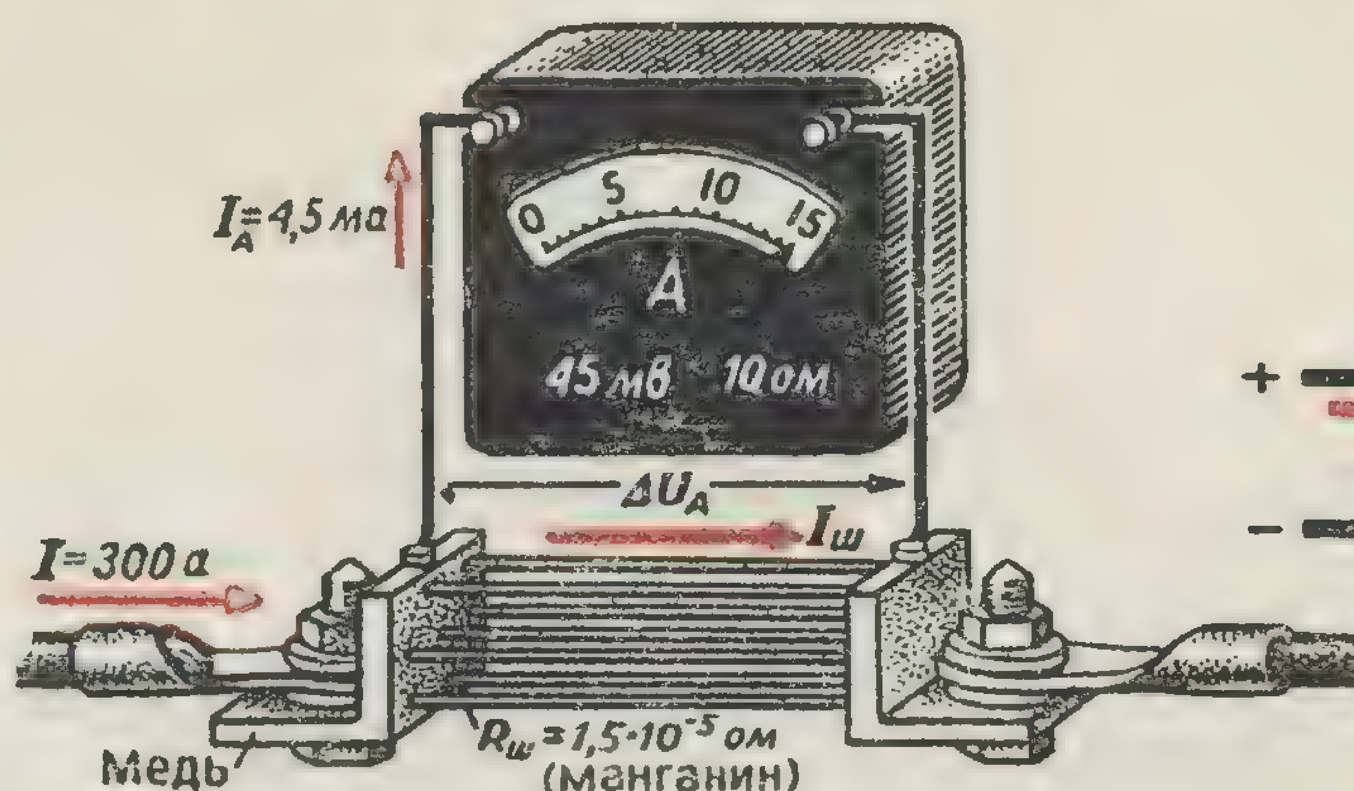
График потенциала

Э.И.Расовский.
Худ. А.Меньшиков

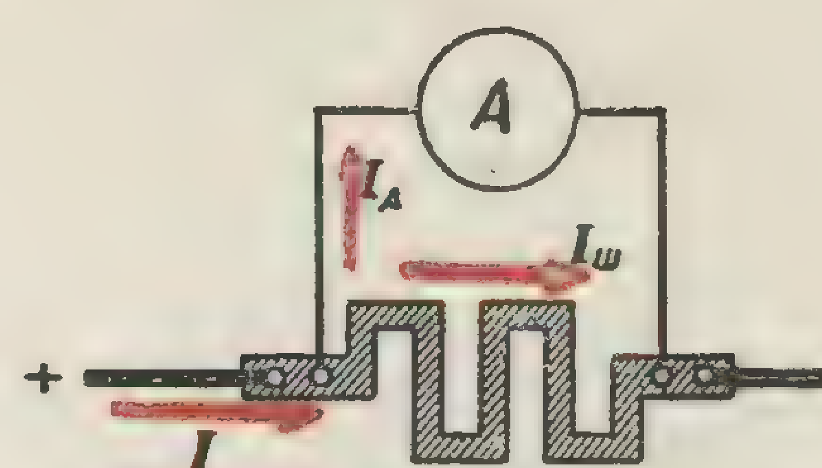
ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ



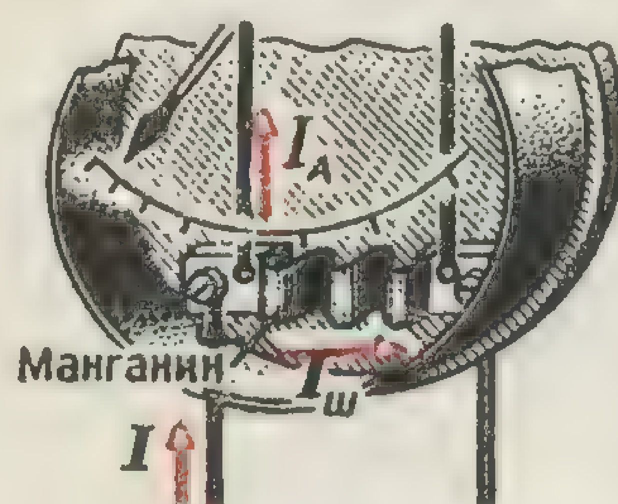
Непосредственное включение амперметра



Амперметр с внешним шунтом для больших токов.



Включение амперметра с шунтом

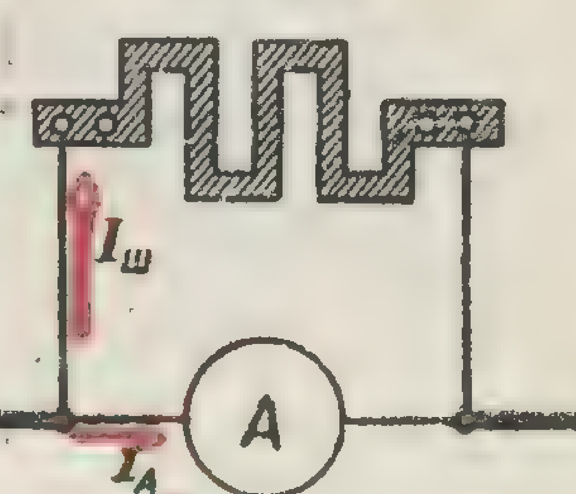


Амперметр со встроенным шунтом

$$\Delta U_A = I_A R_A = I R_ш = \frac{I}{g_A+g_ш} \text{ в}$$
Падение напряжения

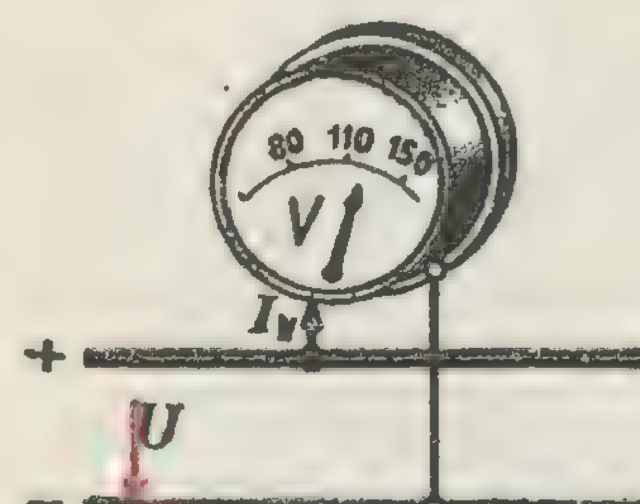
$$K_A = \frac{I}{I_A} = \frac{g_A+g_ш}{g_A} = 1+\frac{R_A}{R_ш}$$
Шунтовой множитель

$$R_ш = \frac{R_A}{K_A-1} \text{ ом}$$
Сопротивление шунта

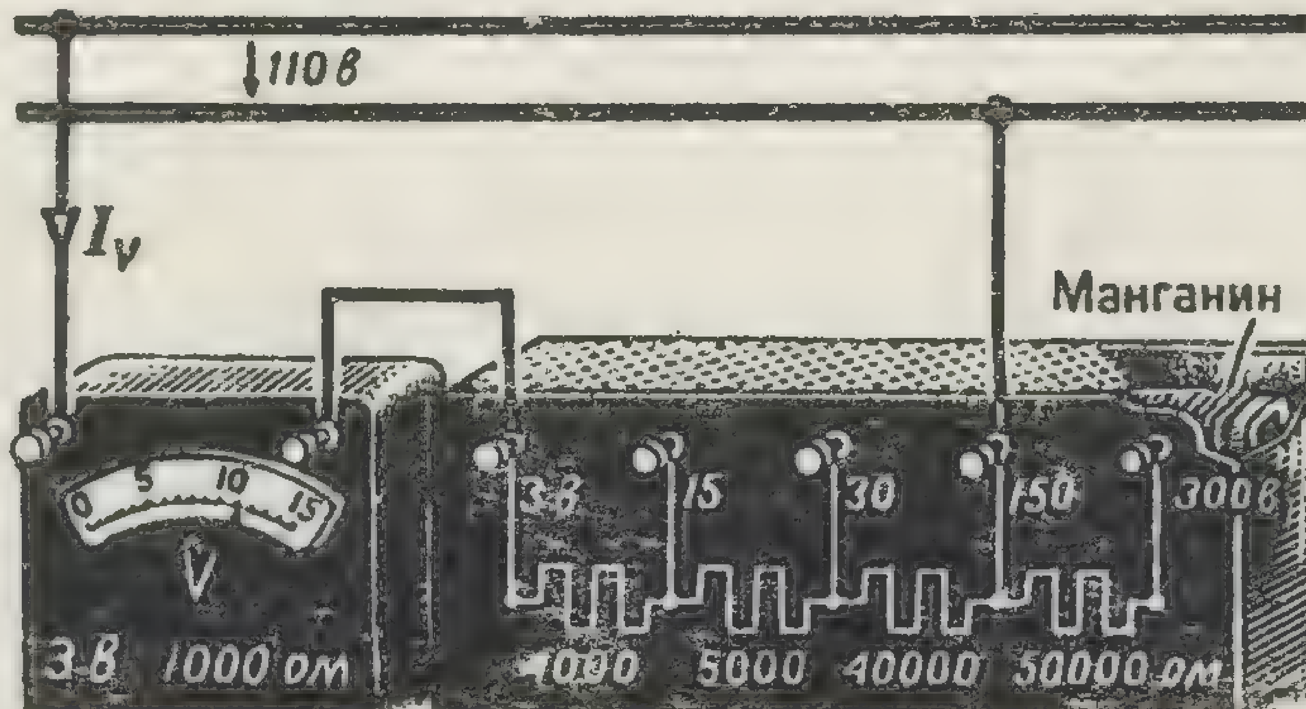


НЕПРАВИЛЬНОЕ включение

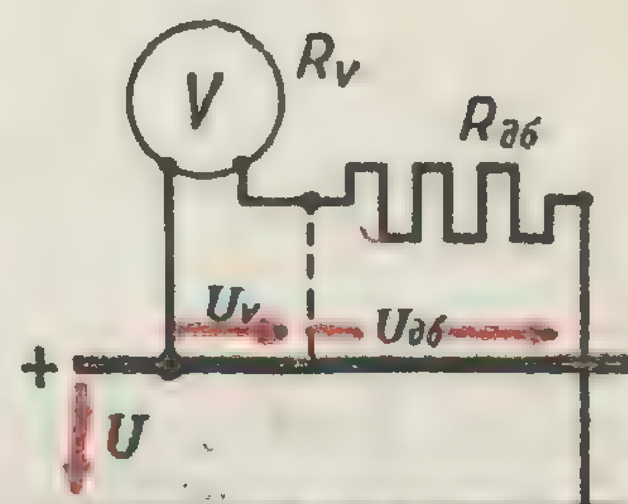
ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА



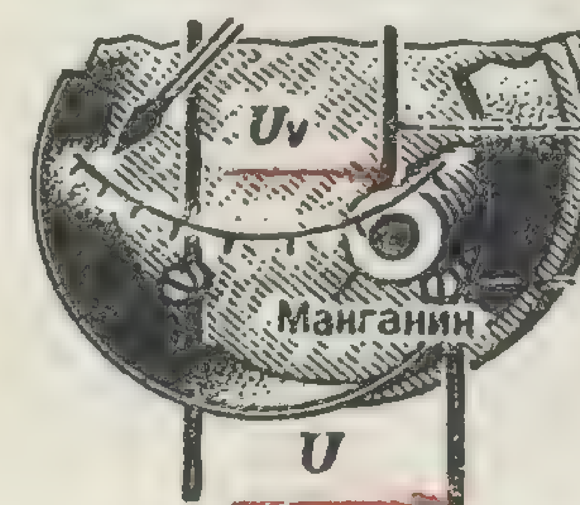
Непосредственное включение вольтметра



Вольтметр с внешним добавочным сопротивлением



Включение вольтметра через добавочн. сопротивление

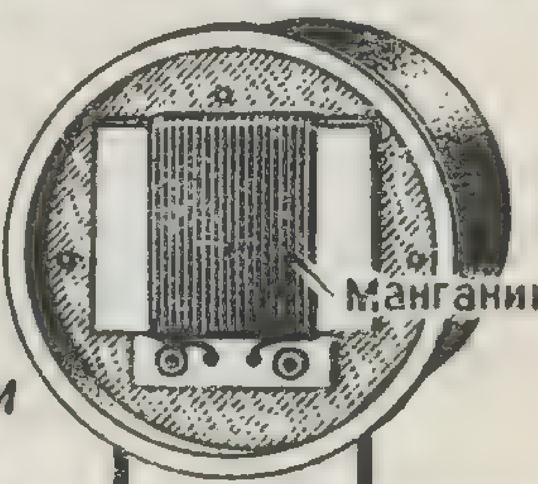


Вольтметр с добавочным сопротивлением

$$I_V = \frac{U_V}{R_V} = \frac{U_{дб}}{R_{дб}} = \frac{U}{R_V+R_{дб}} \text{ а}$$
Потребляемый ток

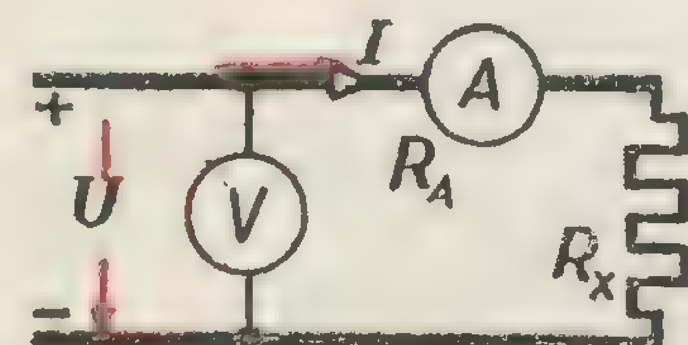
$$K_V = \frac{U}{U_V} = \frac{R_V+R_{дб}}{R_V} = 1+\frac{R_{дб}}{R_V}$$
Множитель

$$R_{дб} = R_V(K_V-1) \text{ ом}$$
Добавочное сопротивление



Добавочное сопротивление под цоколем вольтметра

ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ



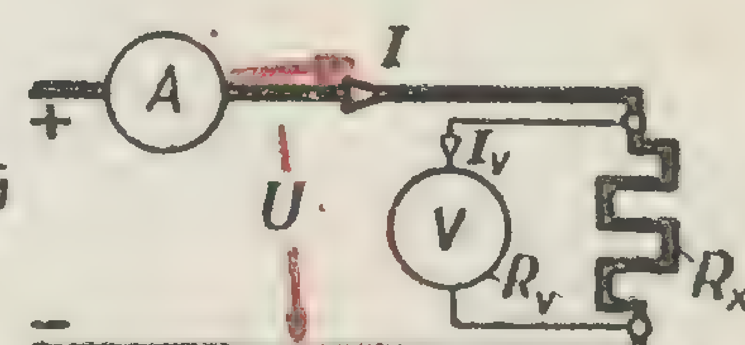
$$R_{изм} = \frac{U}{I} = R_x + R_A \text{ ом}$$
Измеренное сопротивление

$$\Delta f = \frac{R_{изм}-R_x}{R_x} = \frac{R_A}{R_x}$$
Допущенная ошибка

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A \text{ ом}$$
Расчет с поправкой на собственное потребление прибора

Измерение больших сопротивлений

$$g_{изм} = \frac{I}{U} = g_x + g_v \ \frac{1}{\text{ом}}$$
Измеренная проводимость.



$$\Delta f = \frac{g_{изм}-g_x}{g_x} = \frac{R_x}{R_v}$$
Допущенная ошибка

$$R_x = \frac{U}{I-U/R_v} \text{ ом}$$
Расчет с поправкой на собственное потребление прибора

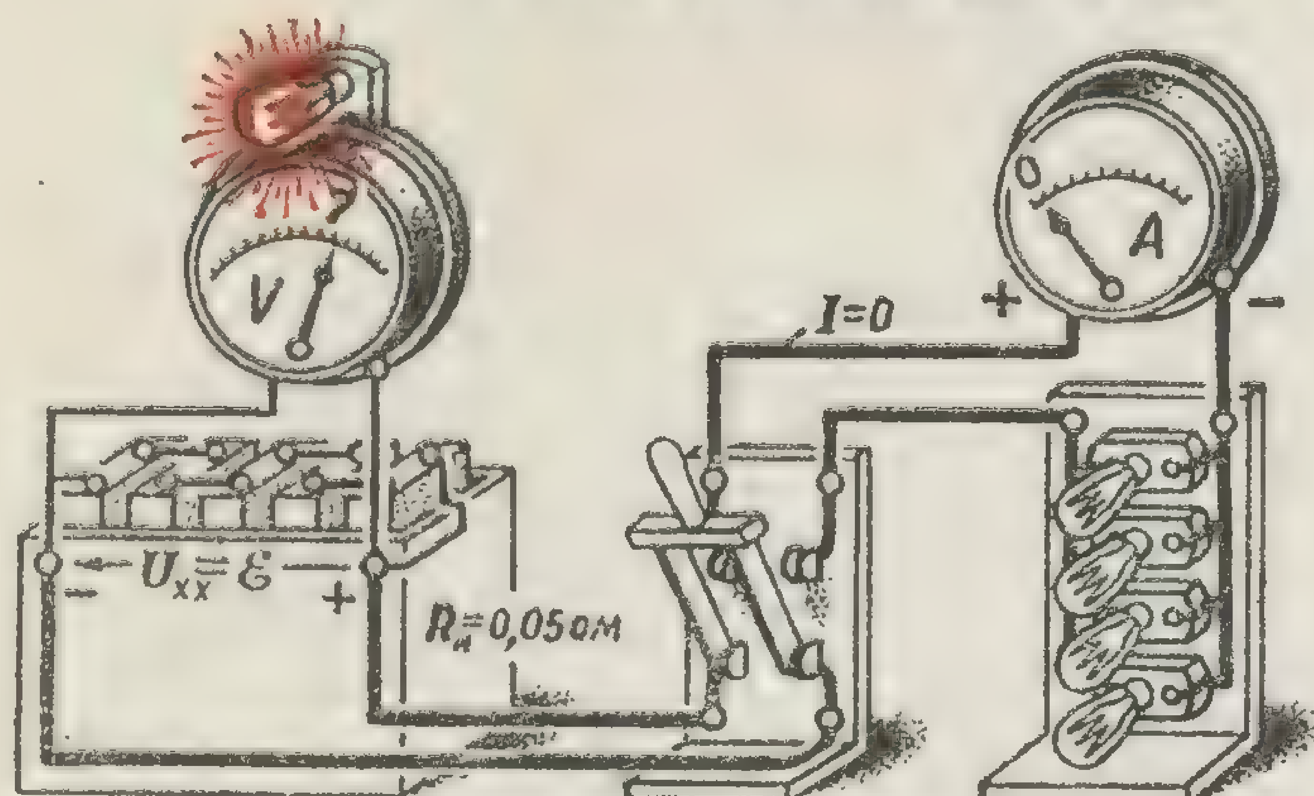
Измерение малых сопротивлений

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВАНИИ ЗАКОНА ОМА

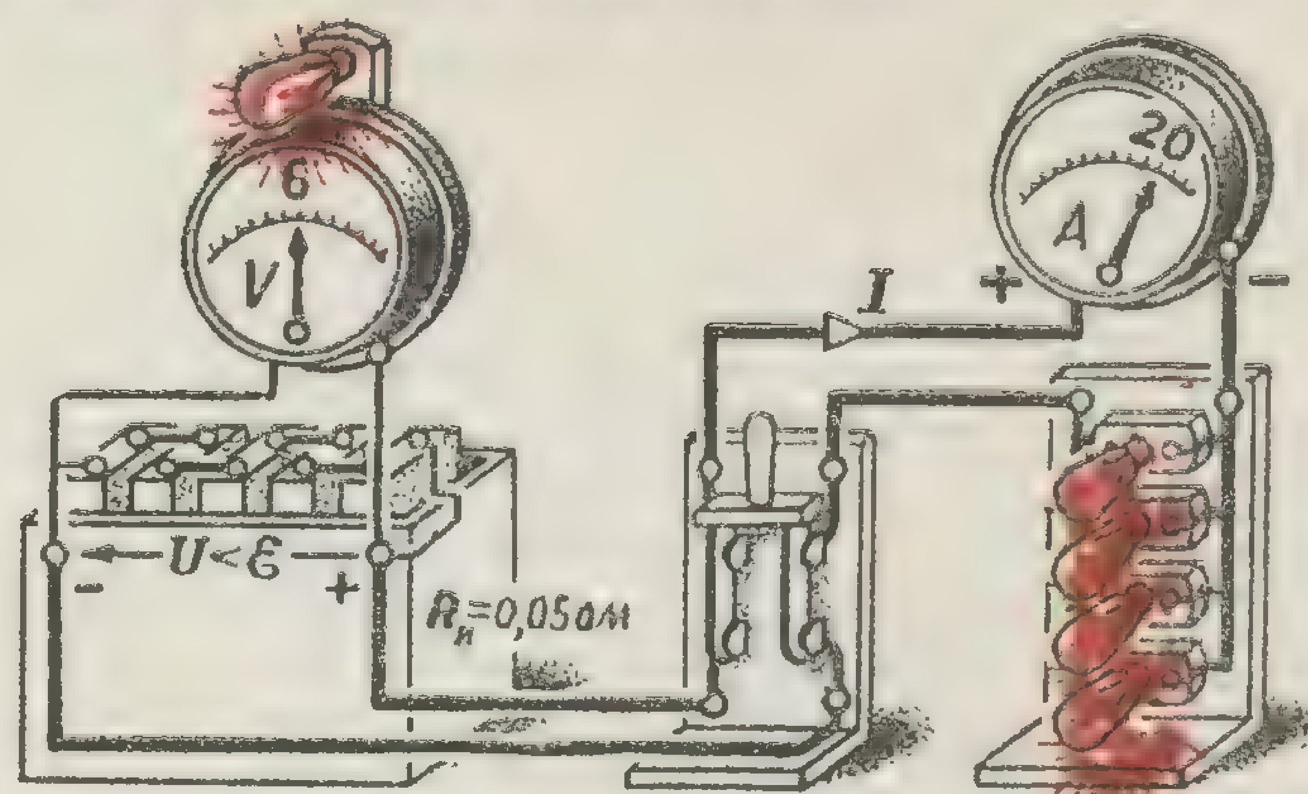
Э.И. Расовский

Худ А Меньшиков

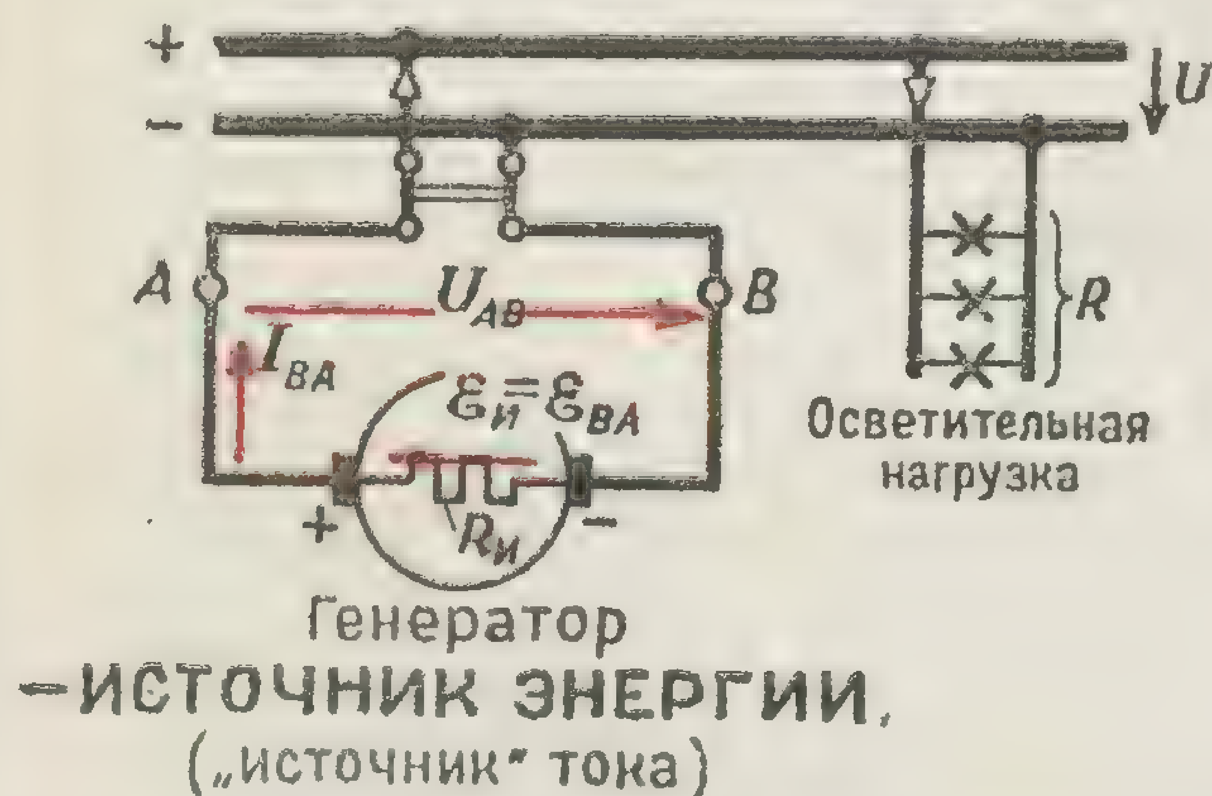
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ИСТОЧНИКА И НАПРЯЖЕНИЕ НА ЕГО ЗАЖИМАХ



Напряжение на зажимах аккумулятора при холостом ходе: $U_{xx}=\mathcal{E}_и$



Напряжение на зажимах аккумулятора при разряде: $U=\mathcal{E}_и-IR_и$



Генератор

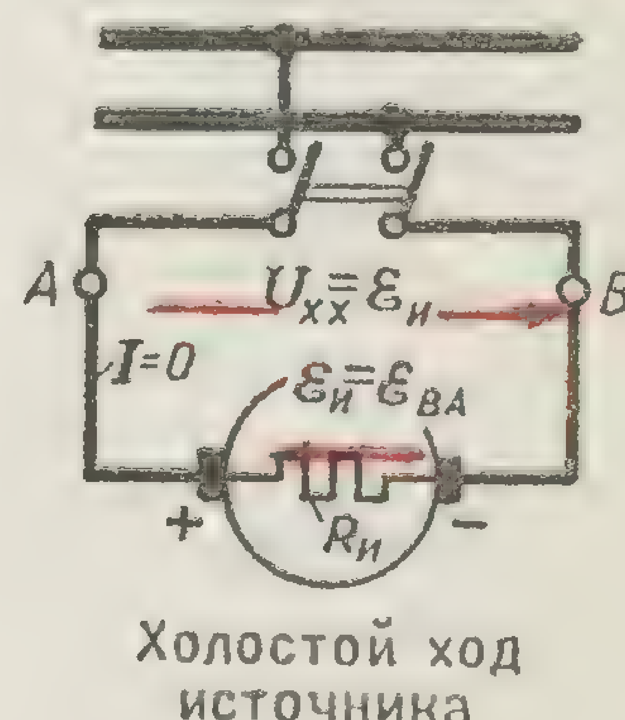
—ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ,

(„источник" тока)

$$U_{AB}=I_{AB}R_и-\mathcal{E}_{AB}=\mathcal{E}_{BA}-I_{BA}R_и \quad в$$

ЗАКОН ОМА

для участка цепи с одним источником (ср. табл. 13)

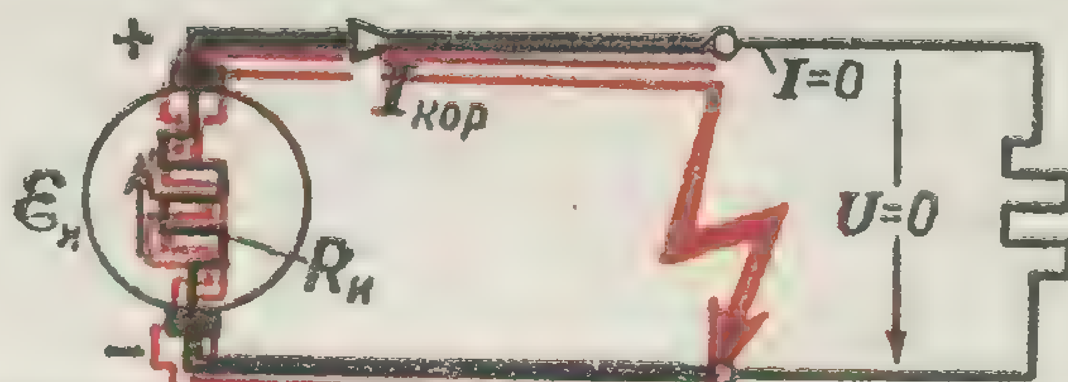


Холостой ход источника

$U=\mathcal{E}_и-IR_и$ в	Напряжение на зажимах источника меньше его э.д.с. на величину внутреннего падения напряжения
$UI=\mathcal{E}_и I-I^2R_и$ вт	Мощность, отдаваемая источником, меньше развиваемой им мощности на величину внутренней потери мощности

$$I_и=\frac{U}{R}=\frac{\mathcal{E}_и-U}{R_и}=\frac{\mathcal{E}_и}{R_и+R} \quad а$$

Ток, „отдаваемый" источником (зависит от сопротивления потребителя)

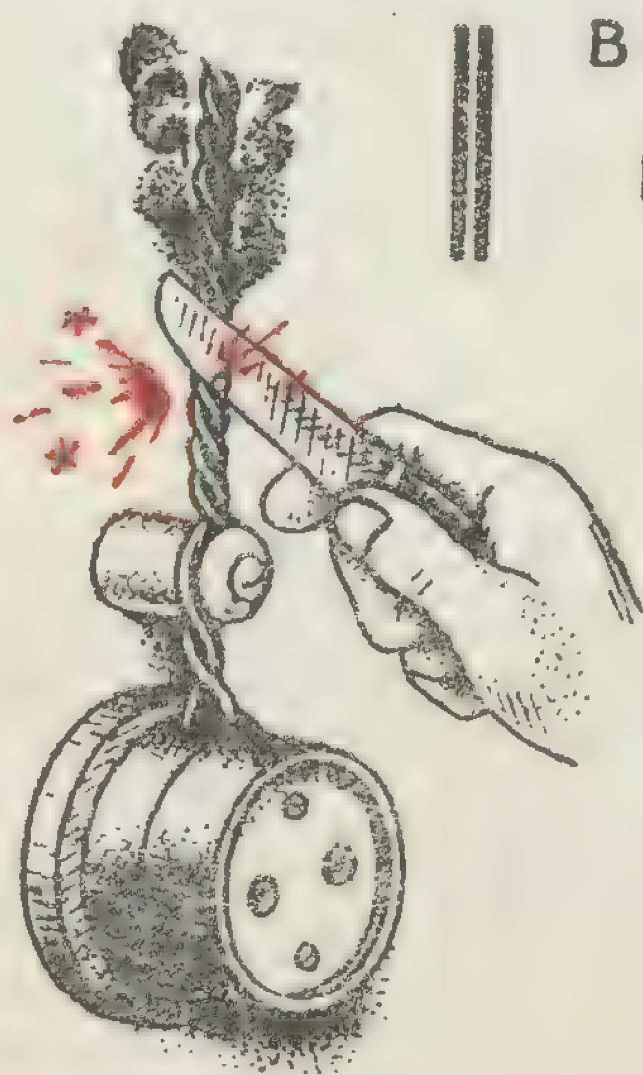


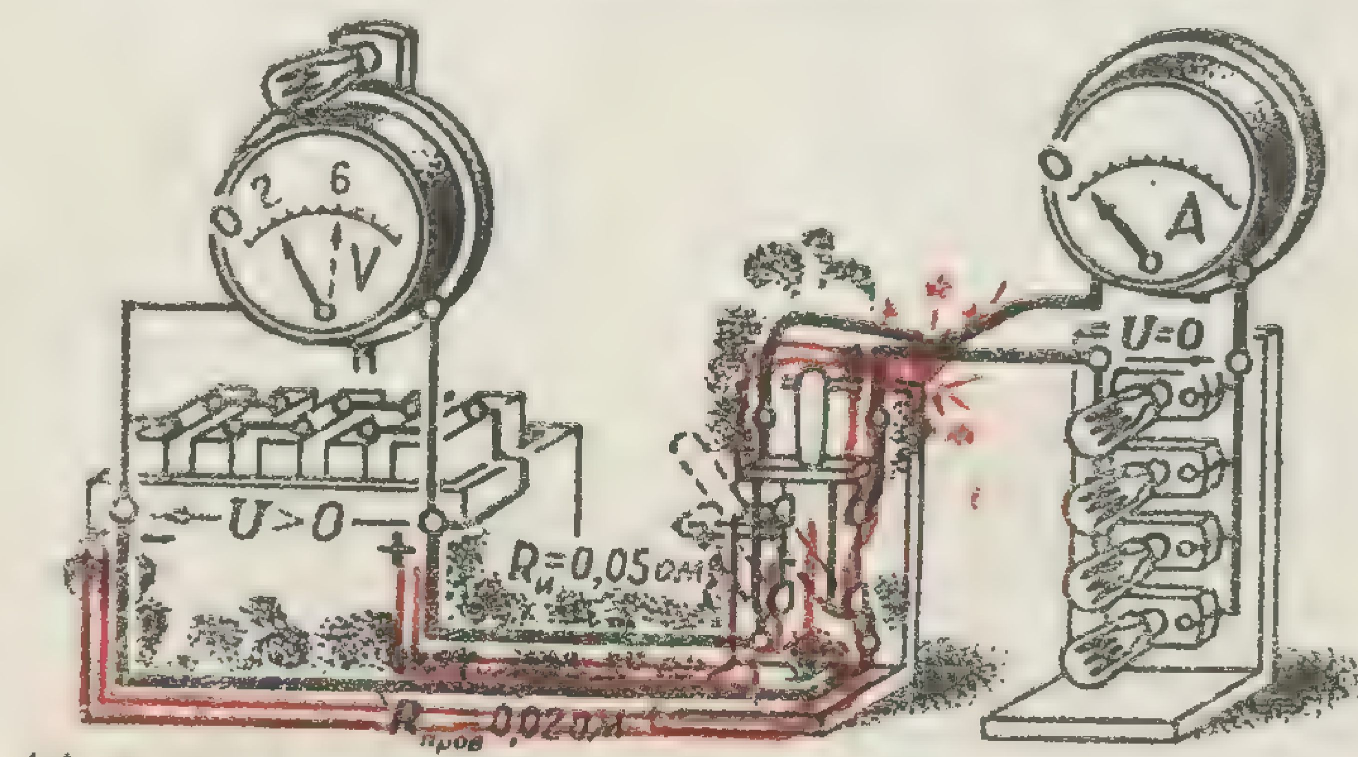
Короткое замыкание на зажимах источника (R=0)

$$I_{кор}=\frac{\mathcal{E}_и}{R_и} \quad а$$

Ток короткого замыкания (аварийный режим)

В источнике ток направлен от минуса (−) к плюсу (+) и совпадает по направлению с э.д.с.
Во внешней цепи ток направлен от плюса к минусу и совпадает с напряжением на зажимах





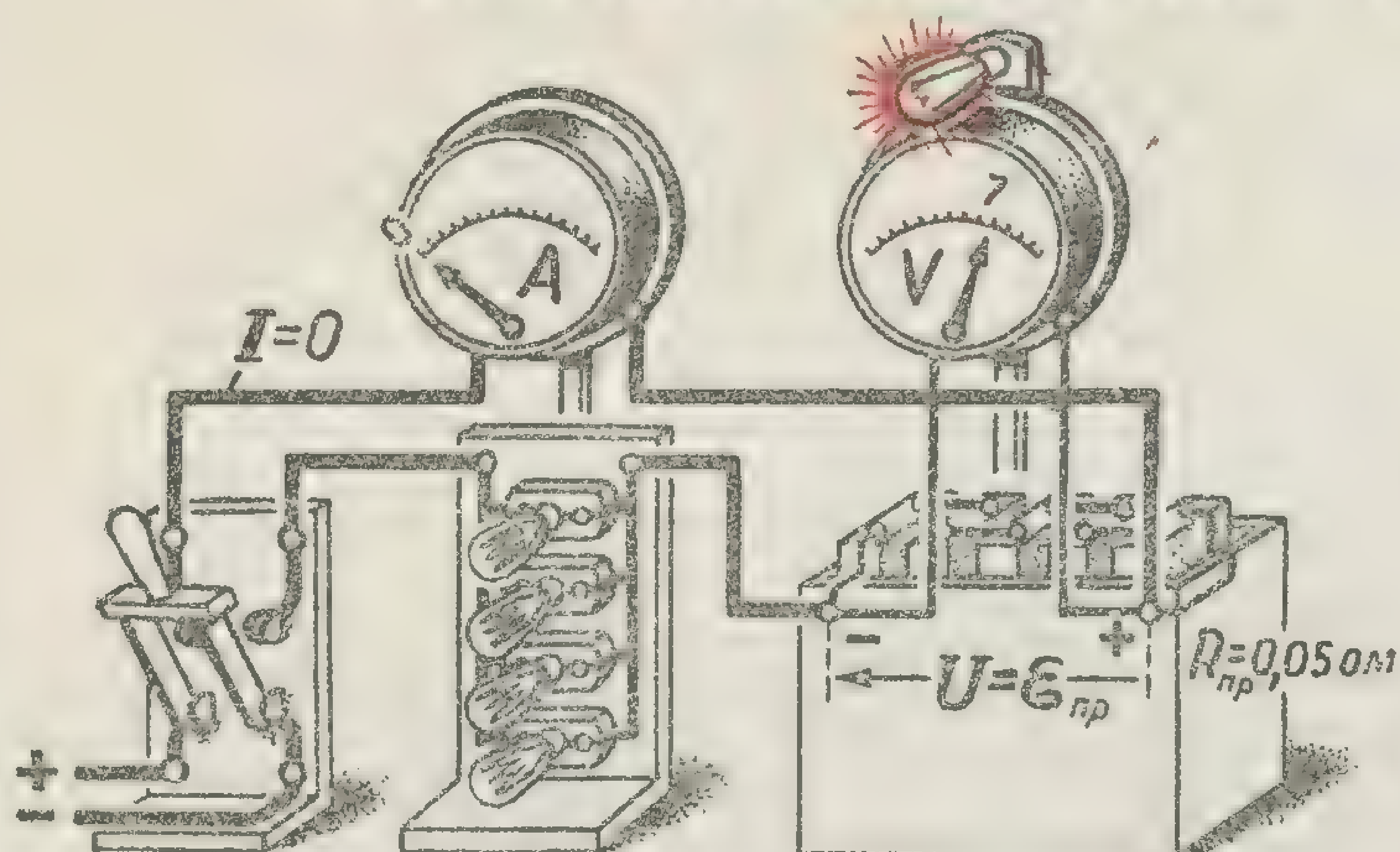


Короткое замыкание

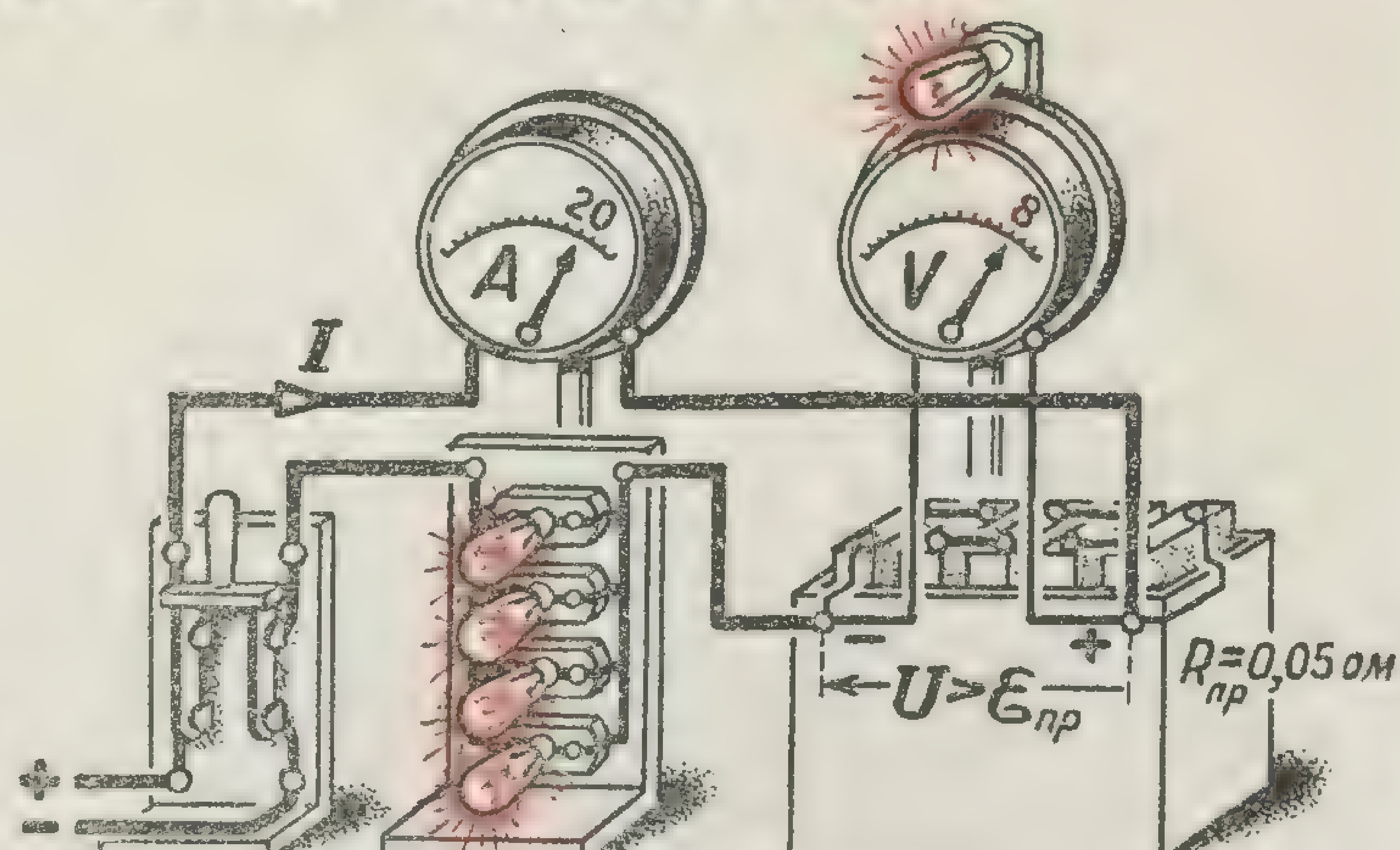
Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

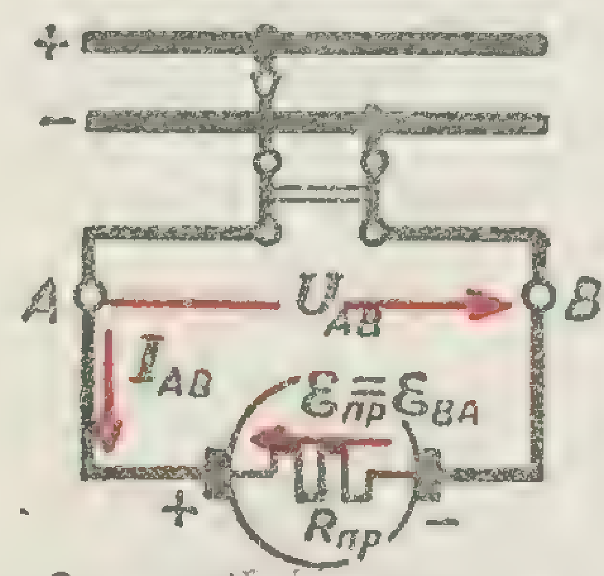
ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА ПРИЁМНИКА И НАПРЯЖЕНИЕ НА ЕГО ЗАЖИМАХ



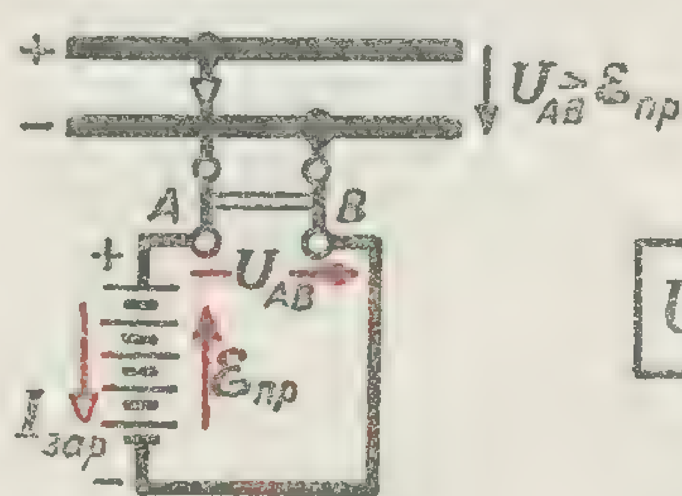
Напряжение на зажимах аккумулятора при разомкнутой цепи



Напряжение на зажимах заряжающегося аккумулятора



Электродвигатель (обращенный генератор)

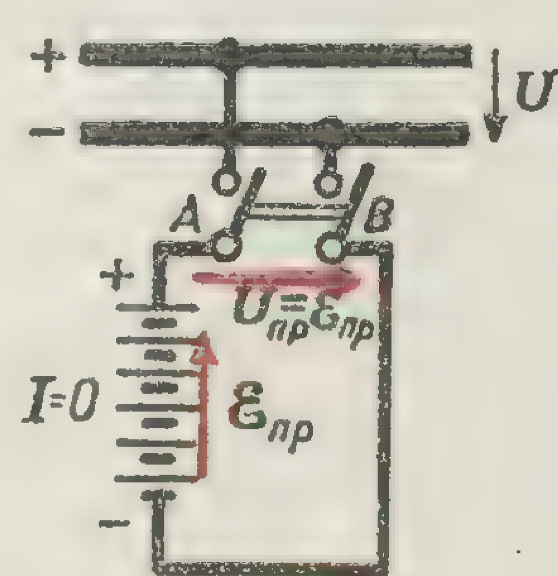


Зарядка аккумуляторной батареи

ПРИЕМНИКИ ЭНЕРГИИ („потребители" тока)

$U_{AB} = I_{AB} R_{пр} - \mathcal{E}_{AB} = \mathcal{E}_{BA} + I_{AB} R_{пр}$ в

ЗАКОН ОМА для участка цепи с одним приемником (ср. табл. 13)



Напряжение на зажимах отключенной батареи

$U = \mathcal{E}_{пр} + IR_{пр}$ в	Напряжение на зажимах приемника больше его э.д.с. на величину внутреннего падения напряжения
$UI = \mathcal{E}_{пр} I + I^2 R_{пр}$ вт	Мощность, потребляемая приемником, больше преобразуемой им мощности на величину внутренней потери мощности

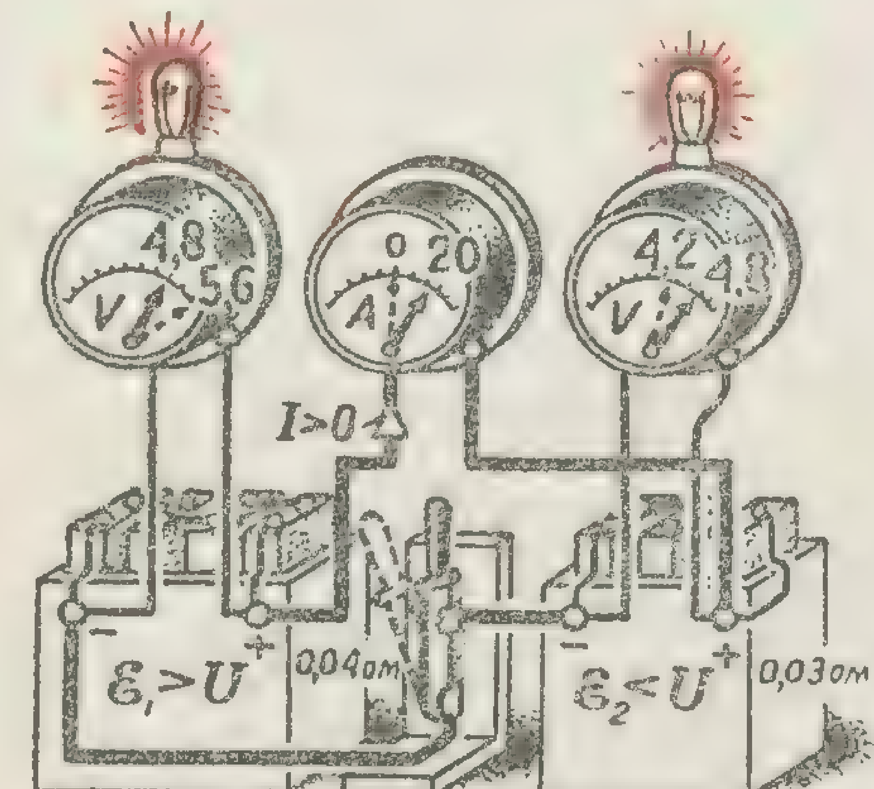
$I_{пр} = \frac{U - \mathcal{E}_{пр}}{R_{пр}}$ а

Ток, „потребляемый" приемником

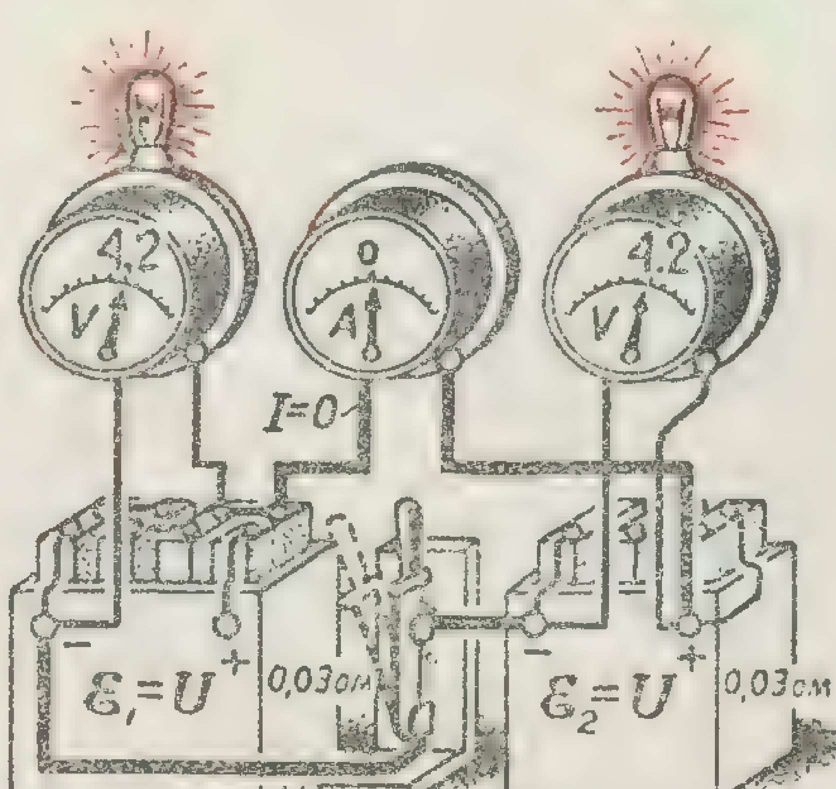
В приемнике ток направлен от плюса (+) к минусу (–) и совпадает с напряжением на зажимах. Э.д.с. же направлена от минуса (–) к плюсу (+) против тока (противо э.д.с.)

$I_{пр} = \frac{U}{R_{пр}}$ а

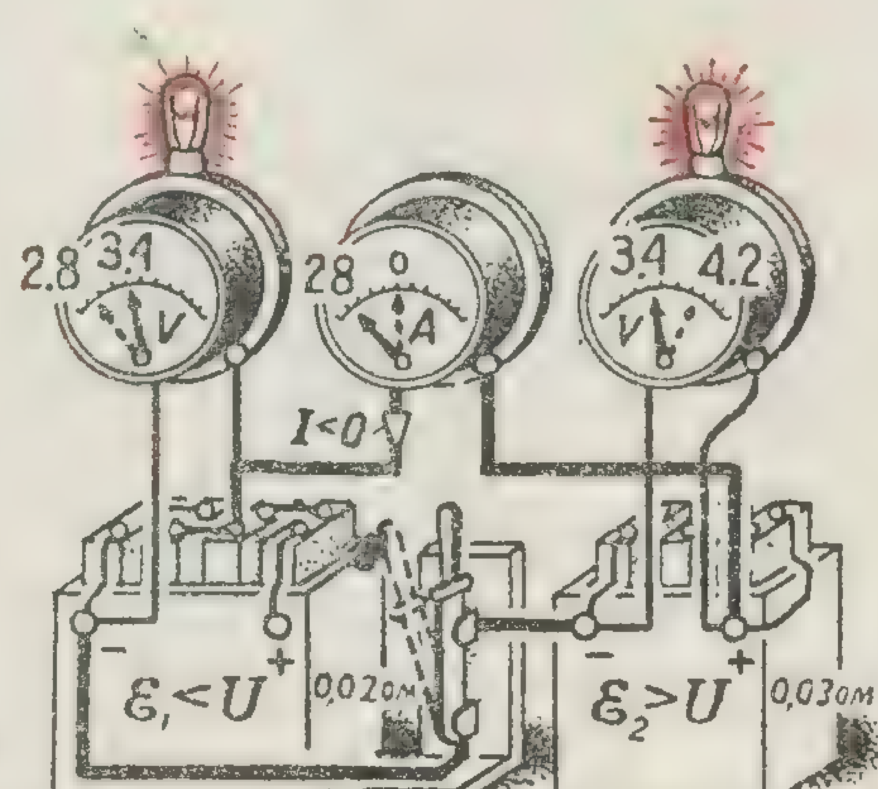
Ток приемника при отсутствии эдс



Источник (разрядка) Приёмник (зарядка)



Встречное включение одинаковых э.д.с.



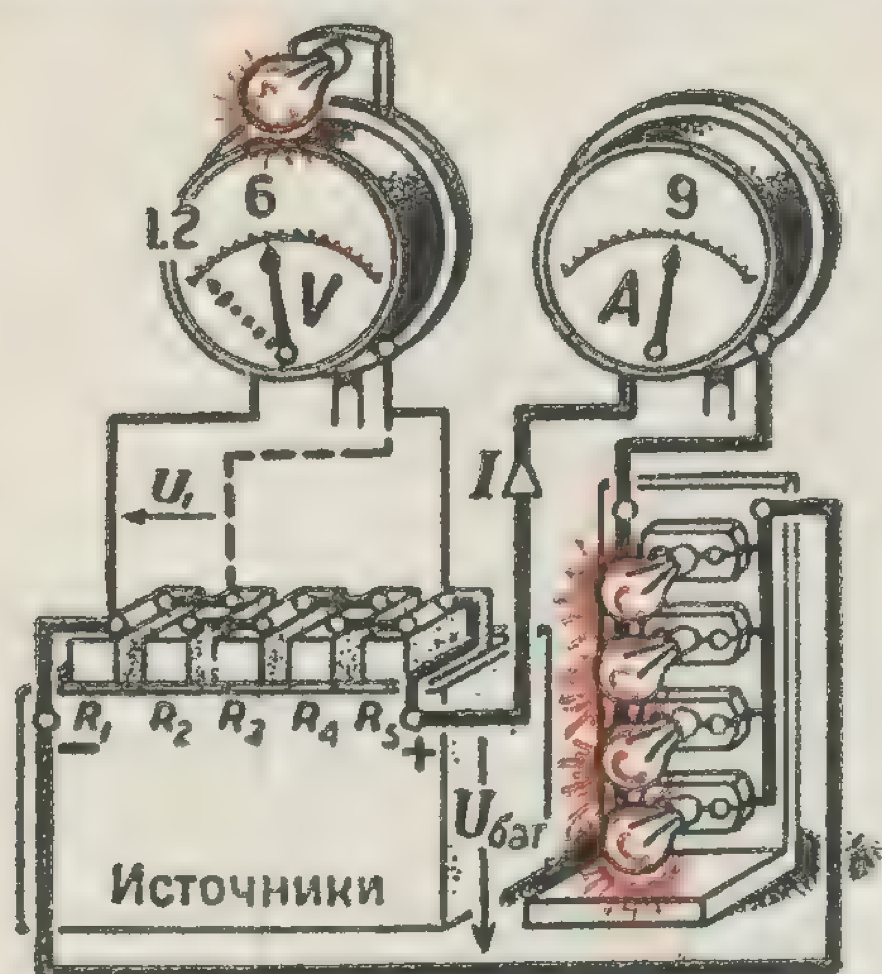
Приёмник (зарядка) Источник (разрядка)

Принцип обратимости

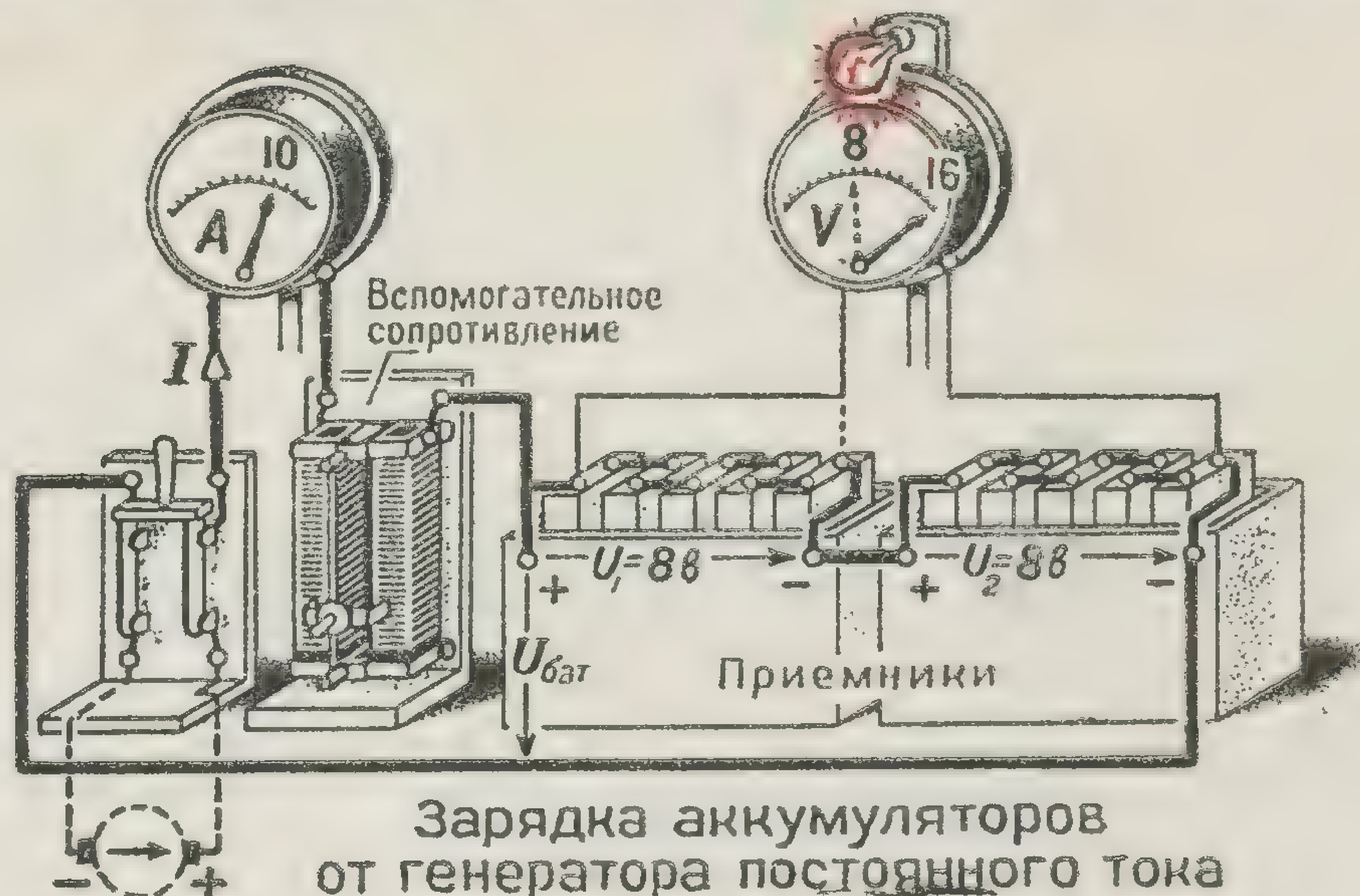
Э.И. Расовский

Худ А. Меньшиков

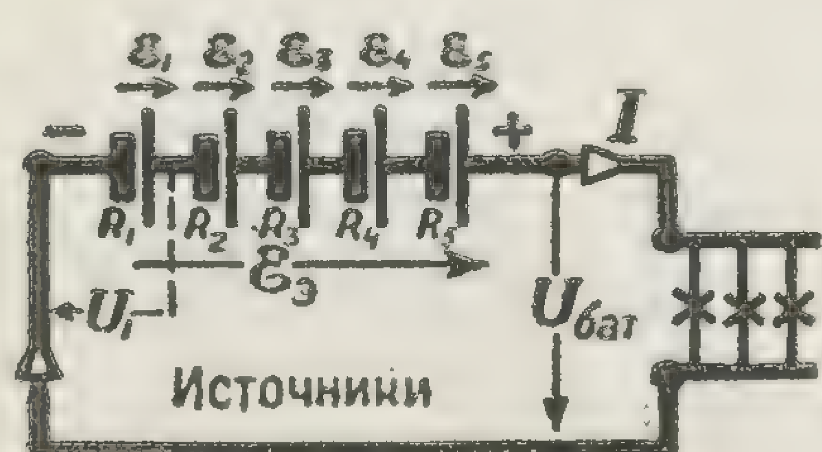
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ И ПРИЕМНИКОВ



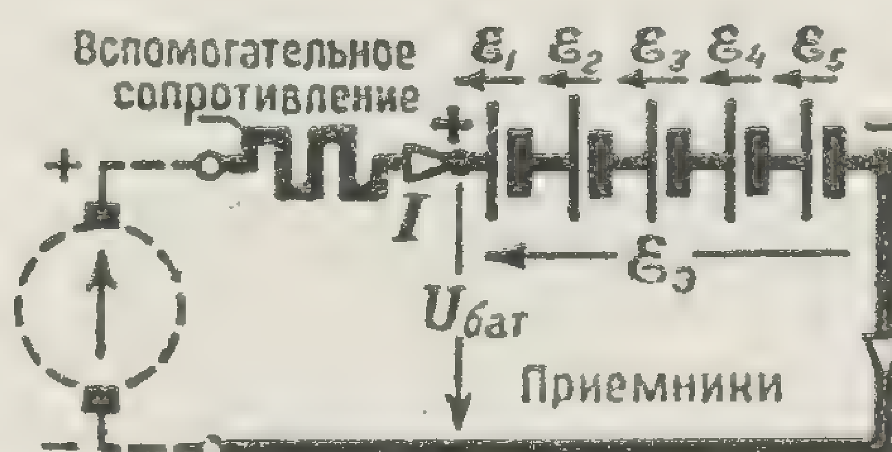
Питание низковольтных ламп от аккумуляторной батареи



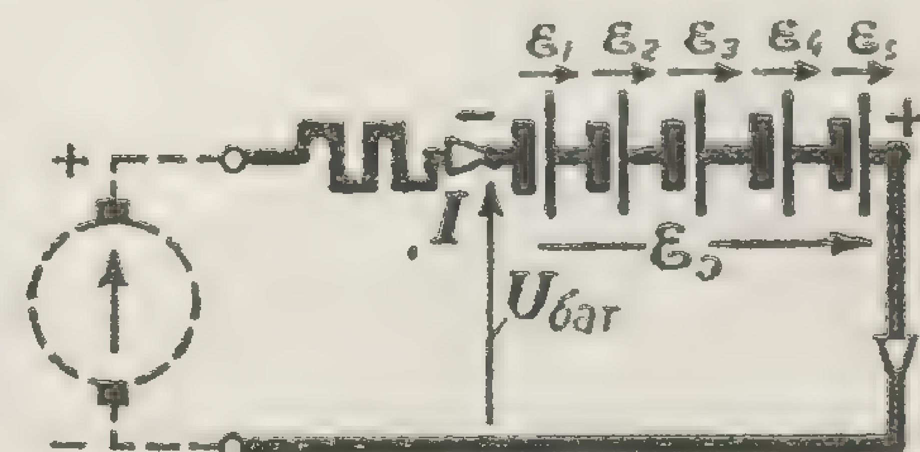
Зарядка аккумуляторов от генератора постоянного тока



Разрядка батареи из последовательно включенных аккумуляторов



Правильное включение



Неправильное включение

Зарядка аккумуляторной батареи

$U_{бат}=\Sigma U=\Sigma\mathcal{E}-I\Sigma R=\mathcal{E}_э-IR_э$ в

Общее напряжение разряжаемой батареи

$\mathcal{E}_э=\Sigma\mathcal{E}$ в

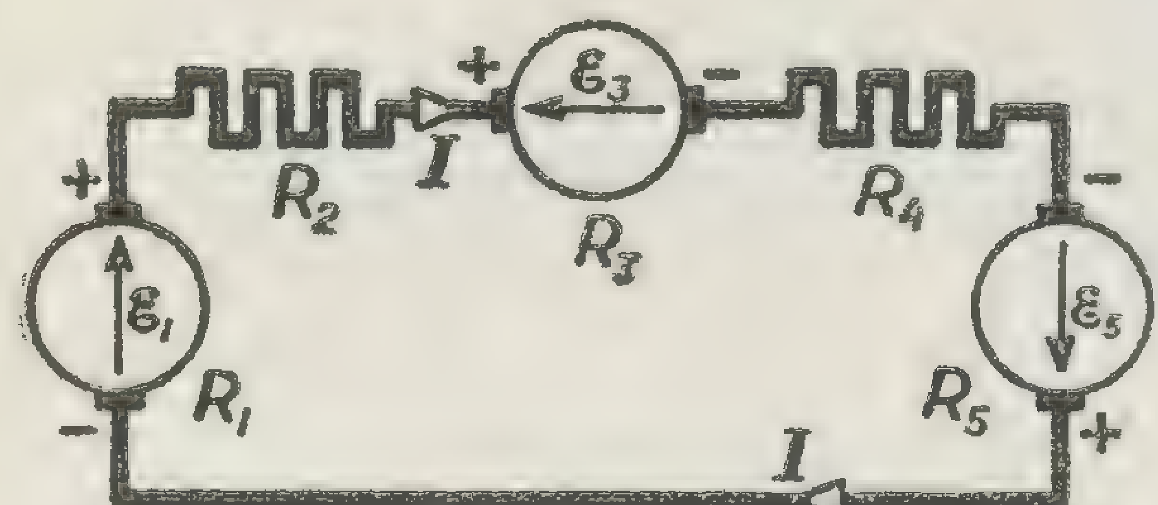
Эквивалентная э.д.с.

$R_э=\Sigma R$ ом

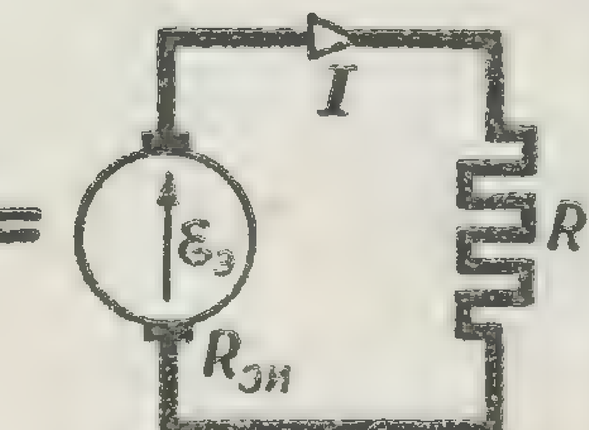
Эквивалентное сопротивление

$U_{бат}=\Sigma U=\Sigma\mathcal{E}+I\Sigma R=\mathcal{E}_э+IR_э$ в

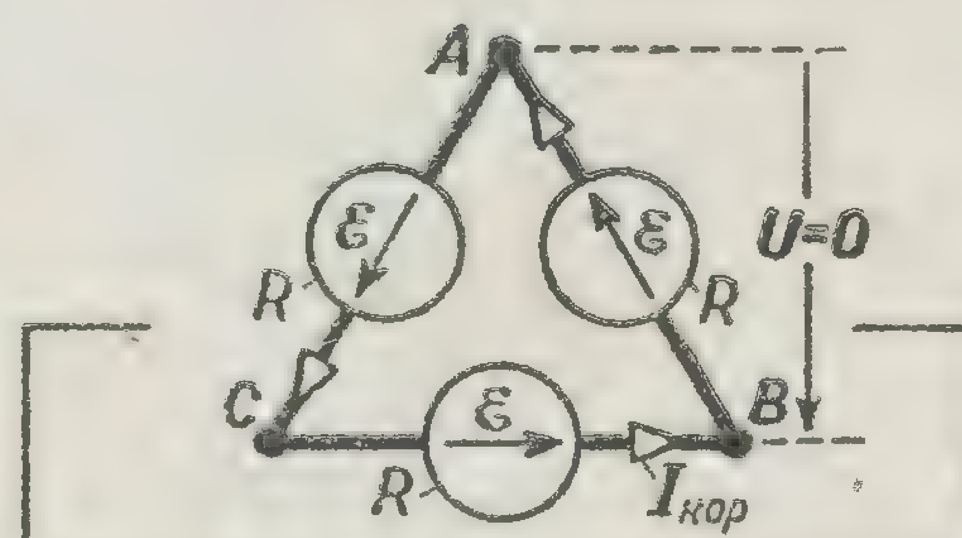
Общее напряжение заряжаемой батареи



Замкнутая последовательная цепь



Эквивалентная схема



Короткое замыкание трех источников

$R_э=R_1+R_2+\dots=\Sigma R_к$ ом

Общее (эквивалентное) сопротивление

$\mathcal{E}_э=\mathcal{E}_1-\mathcal{E}_2+\mathcal{E}_3+\dots=\Sigma\mathcal{E}_н$ в

Эквивалентная э.д.с.

$I=\frac{\Sigma\mathcal{E}_к}{\Sigma R_к}=\frac{\mathcal{E}_э}{R_{эи}+R}$ а

Закон Ома для замкнутой цепи

$I_{кор}=\frac{\mathcal{E}}{R}$ а

Ток короткого замыкания

$U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}=0$ в

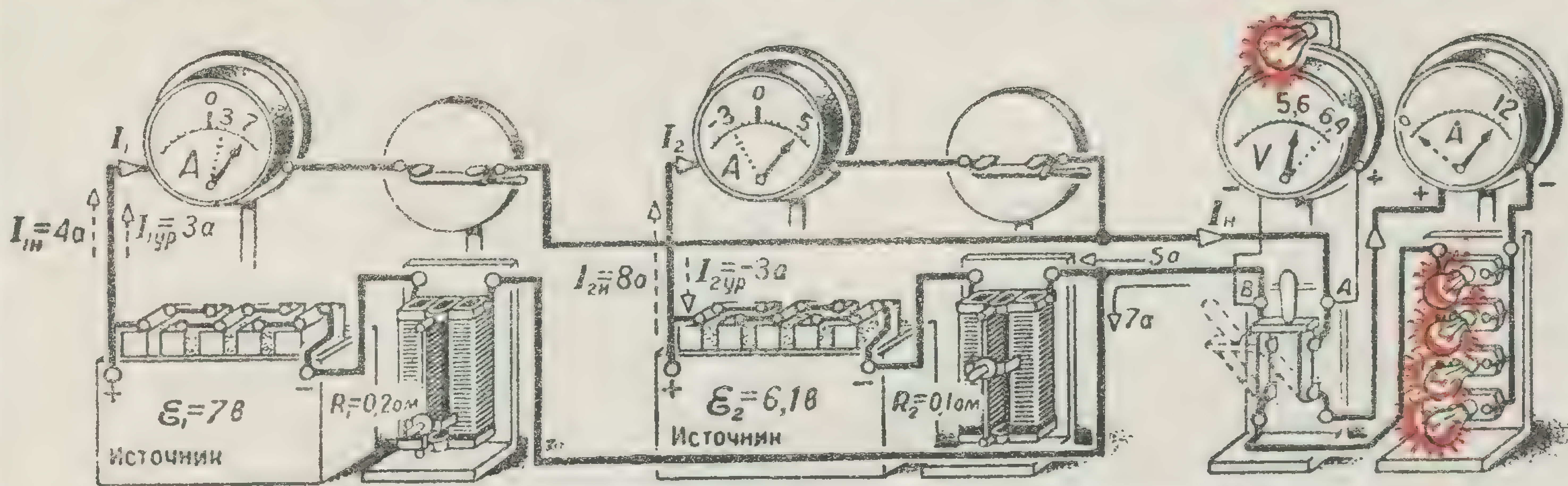
Напряжение на зажимах

В замкнутой неразветвленной электрической цепи общее сопротивление равно сумме сопротивлений отдельных участков. Эквивалентная э.д.с. равна алгебраической сумме отдельных э.д.с.

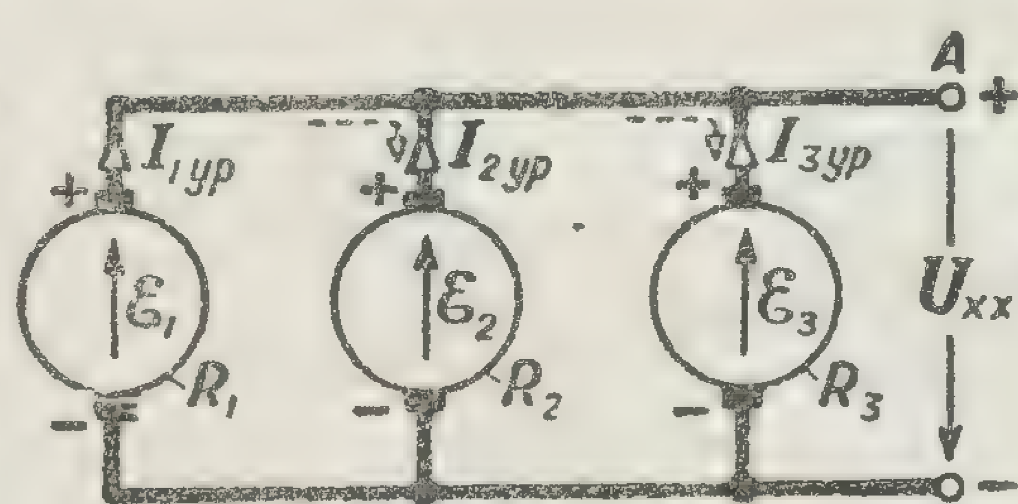
Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

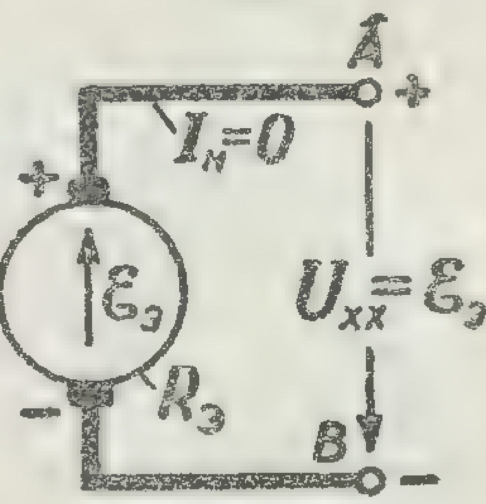
ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИЛИ ПРИЕМНИКОВ



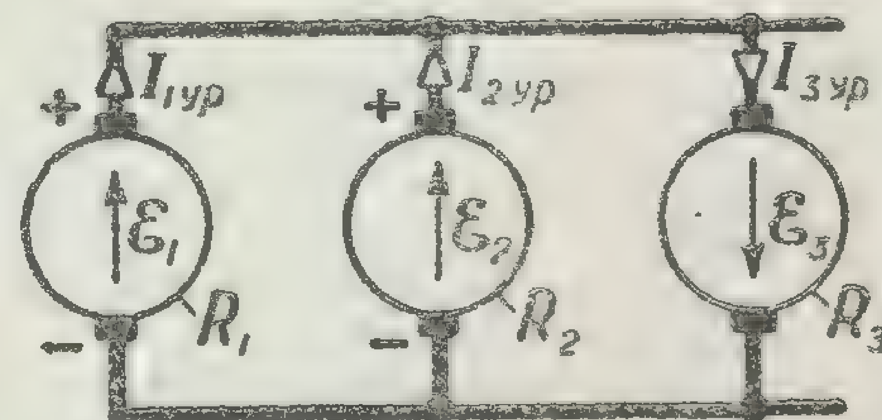
Питание осветительной нагрузки двумя параллельно соединенными аккумуляторами



Холостой ход параллельно включенных источников



Эквивалентный источник



НЕПРАВИЛЬНОЕ включение третьего источника на параллельную работу

$$\frac{1}{R_э}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}=\sum\frac{1}{R_и}=\sum g_и \quad \frac{1}{ом}$$

Проводимость эквивалентного источника

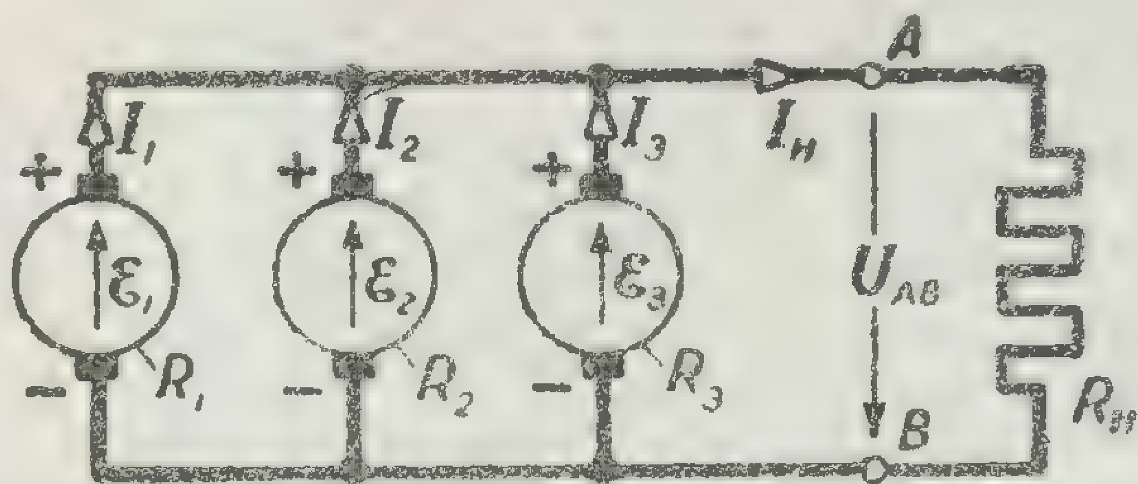
$$\mathcal{E}_э=U_{xx}=R_э\cdot\sum I_{кор}=R_э\cdot\sum\frac{\mathcal{E}_и}{R_и}=\frac{\sum\mathcal{E}_и g_и}{\sum g_и} \quad в$$

Э.д.с. эквивалентного источника (напряжение холостого хода)

$$I_{1ур}=\frac{\mathcal{E}_1-U_{xx}}{R_1} \quad а$$

Уравнительный ток одного из источников при холостом ходе

Х О Л О С Т О Й Х О Д



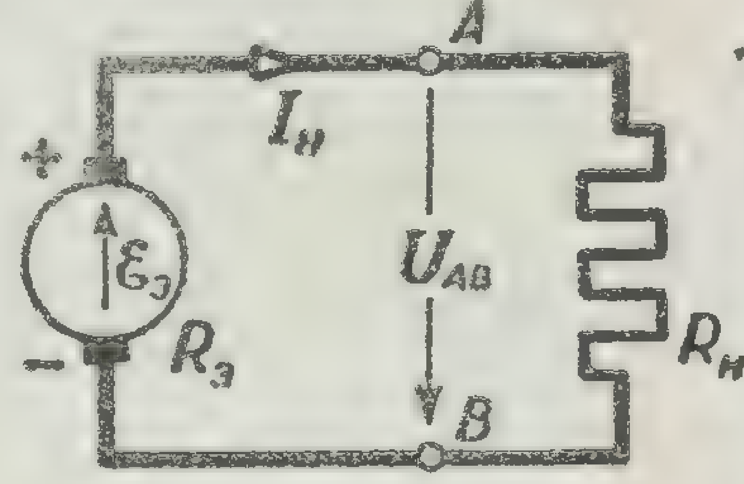
Нагрузка параллельно соединенных источников

$$I_н=\frac{\mathcal{E}_э}{R_э+R_н}=I_{1н}+I_{2н}+I_{3н}=I_1+I_2+I_3 \quad а$$

Общий ток нагрузки.

$$U_{AB}=\mathcal{E}_э-I_н R_э=I_н R_н \quad в$$

Общее напряжение



Эквивалентная схема

$$I_{1н}:I_{2н}:I_{3н}=I_н\frac{R_э}{R_1}:I_н\frac{R_э}{R_2}:I_н\frac{R_э}{R_3}=\frac{1}{R_1}:\frac{1}{R_2}:\frac{1}{R_3}$$

Распределение тока нагрузки между источниками

$$I_1=I_{1ур}+I_{1н}=\frac{\mathcal{E}_1-U_{xx}}{R_1}+I_н\frac{R_э}{R_1}=\frac{\mathcal{E}_1-U_{AB}}{R_1} \quad а$$

Ток одного из источников при нагрузке

$$R_э=\frac{R_1}{n};\ \mathcal{E}_э=\mathcal{E}_1;\ I_1=\frac{I_н}{n}$$

Частный случай n одинаковых источников

Н А Г Р У З К А

При параллельном соединении источников (или приемников) проводимость эквивалентного источника (приемника). равна сумме отдельных проводимостей

Эквивалентная э.д.с. равна общему току короткого замыкания источников (приемников), помноженному на их эквивалентное сопротивление

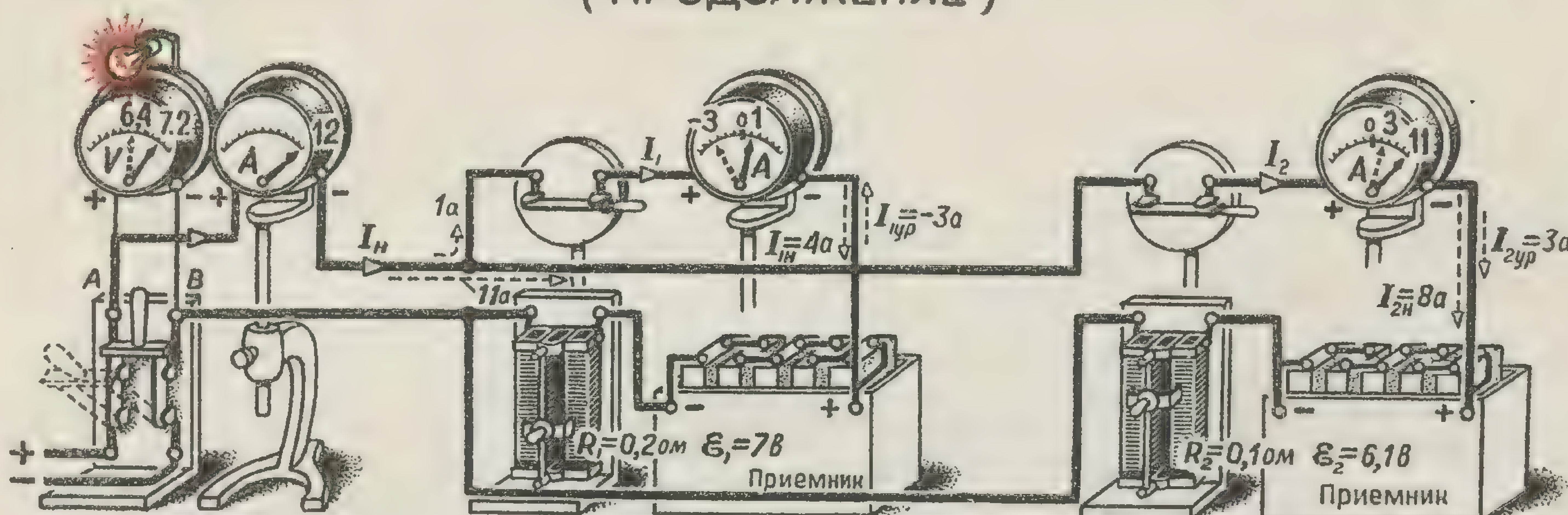
Общий ток нагрузки распределяется между отдельными источниками (приемниками) обратно пропорционально их сопротивлениям

Ток каждого источника (приемника) состоит из его тока нагрузки и уравнительного тока при холостом ходе

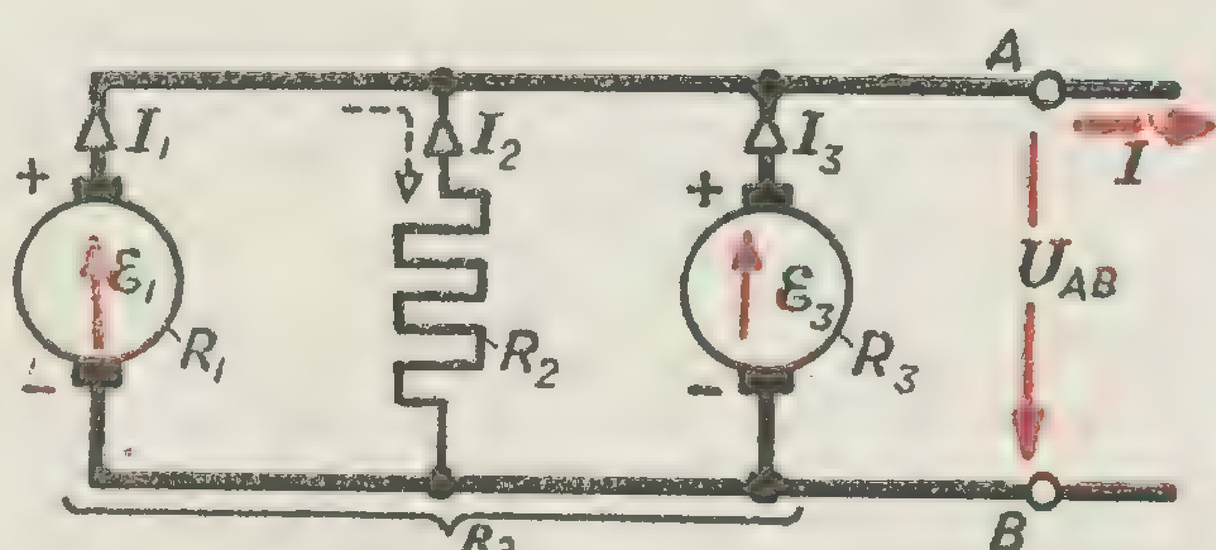
Э. И. Расовский.

Худ А. Меньшиков

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ИЛИ ПРИЕМНИКОВ
(ПРОДОЛЖЕНИЕ)



Зарядка параллельно включенных аккумуляторов



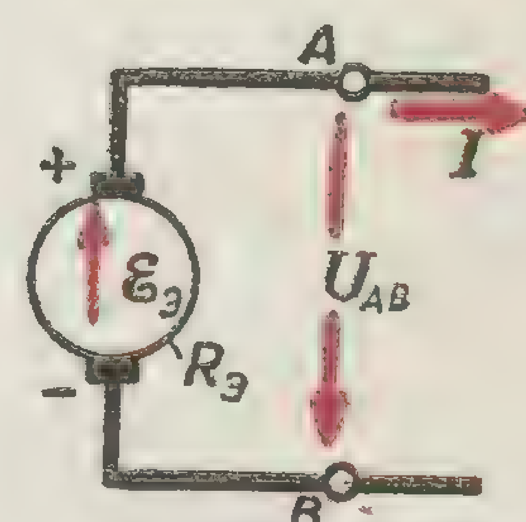
Исходная схема

$$\frac{1}{R_э}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\dots=\sum\frac{1}{R}\ \frac{1}{ом}$$

Проводимость эквивалентной ветви

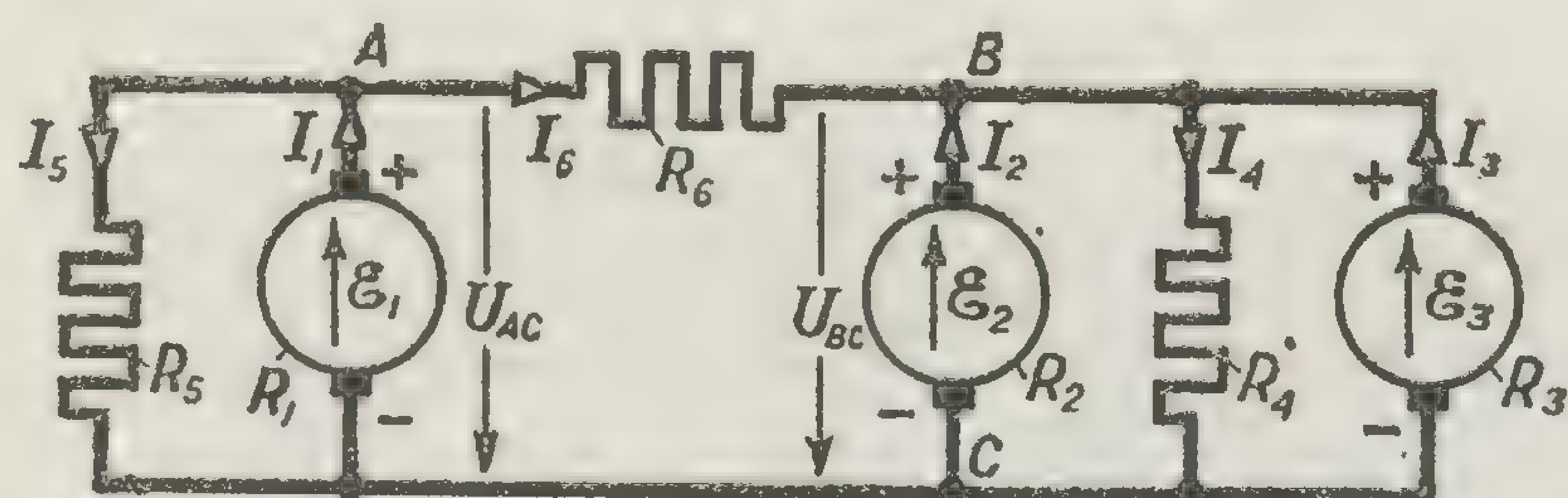
$$\mathcal{E}_э=R_э\cdot\sum I_{кор}=\frac{\sum\mathcal{E}g}{\sum g}\ в$$

Эквивалентная э.д.с.



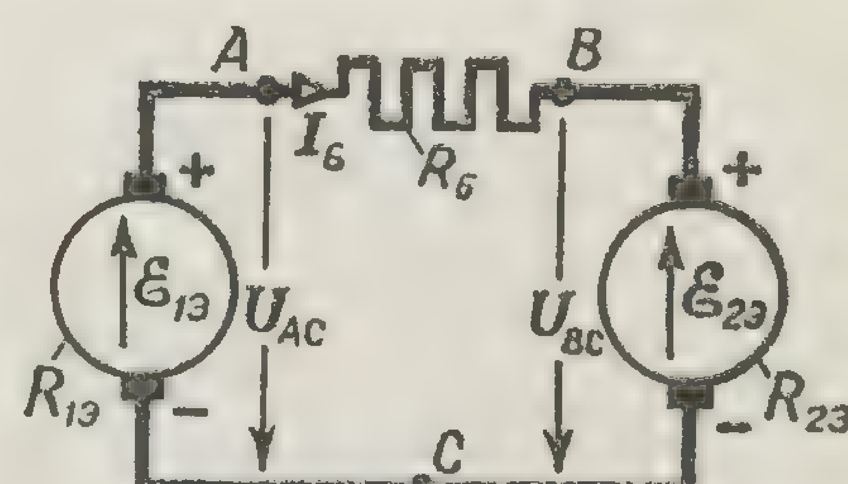
Эквивалентная ветвь

Общий случай параллельного соединения нескольких ветвей



Разветвленная цепь с несколькими источниками

=



Эквивалентная схема

$$R_{1э}=\frac{R_1\cdot R_5}{R_1+R_5}\qquad R_{2э}=\frac{R_2\cdot R_3\cdot R_4}{R_2R_3+R_3R_4+R_2R_4}\ ом$$

$$\mathcal{E}_{1э}=R_{1э}I_{1кор}=R_{1э}\frac{\mathcal{E}_1}{R_1}\qquad \mathcal{E}_{2э}=R_{2э}\left(\frac{\mathcal{E}_2}{R_2}+\frac{\mathcal{E}_3}{R_3}\right)\ в$$

Сопротивления и э.д.с. эквивалентных источников

$$I_{ур}=I_6=\frac{\mathcal{E}_{1э}-\mathcal{E}_{2э}}{R_{1э}+R_6+R_{2э}}\ а$$

Уравнительный ток в эквивалентной схеме

$$U_{AC}=\mathcal{E}_{1э}-I_6R_{1э}\qquad U_{BC}=\mathcal{E}_{2э}+I_6R_{2э}\ в$$

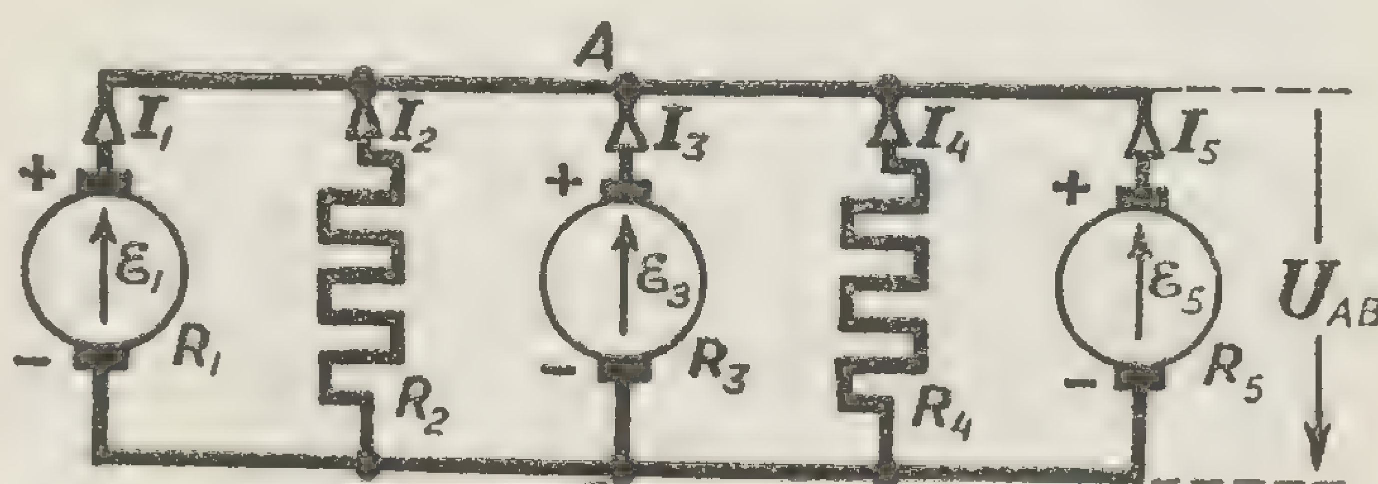
$$I_1=\frac{\mathcal{E}_1-U_{AC}}{R_1};\ I_5=\frac{U_{AC}}{R_5}\qquad I_2=\frac{\mathcal{E}_2-U_{BC}}{R_2};\ I_4=\frac{U_{BC}}{R_1};\ I_3=\frac{\mathcal{E}_3-U_{BC}}{R_3}\ а$$

Напряжения и токи в исходной схеме

Пример расчета разветвленной цепи методом эквивалентной э.д.с.

$$U_{AB}=\frac{\sum\mathcal{E}g}{\sum g}\ в$$

Узловое напряжение



$$I_1=\frac{\mathcal{E}_1-U_{AB}}{R_1}\ а$$

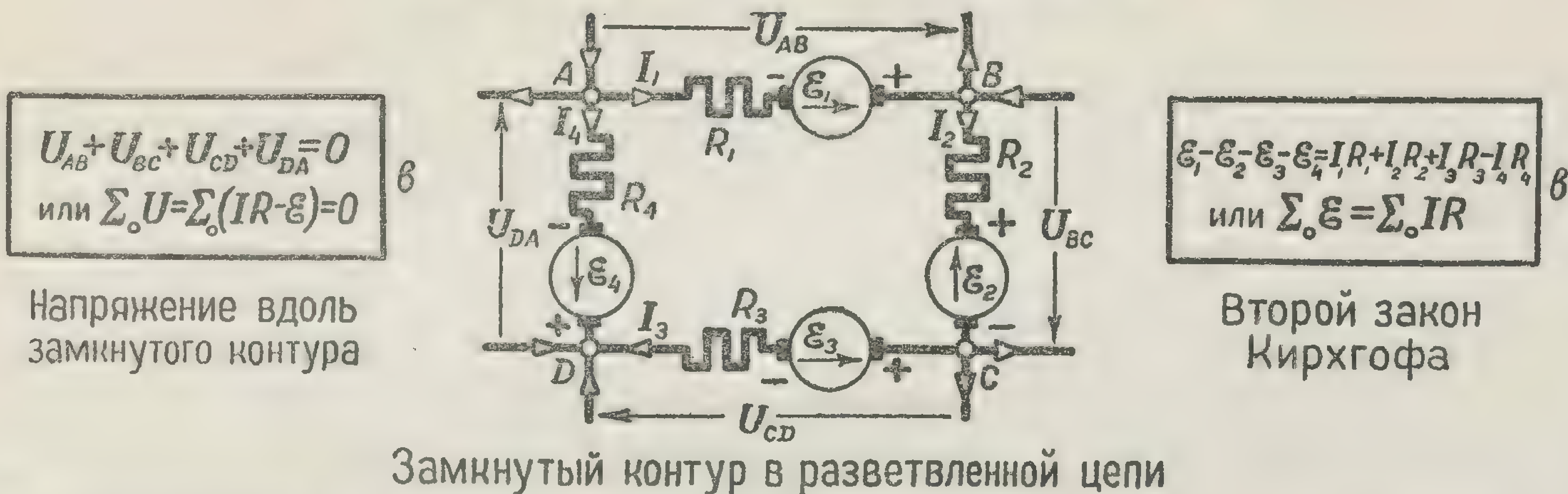
Ток в одной из ветвей

Частный случай цепи с двумя узлами

Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

РАЗВЕТВЛЕННЫЕ ЦЕПИ



$U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} + U_{DA} = 0$ в
или $\sum_o U = \sum_o (IR - \mathcal{E}) = 0$

Напряжение вдоль замкнутого контура

$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_3 - \mathcal{E}_4 = I_1R_1 + I_2R_2 + I_3R_3 - I_4R_4$ в
или $\sum_o \mathcal{E} = \sum_o IR$

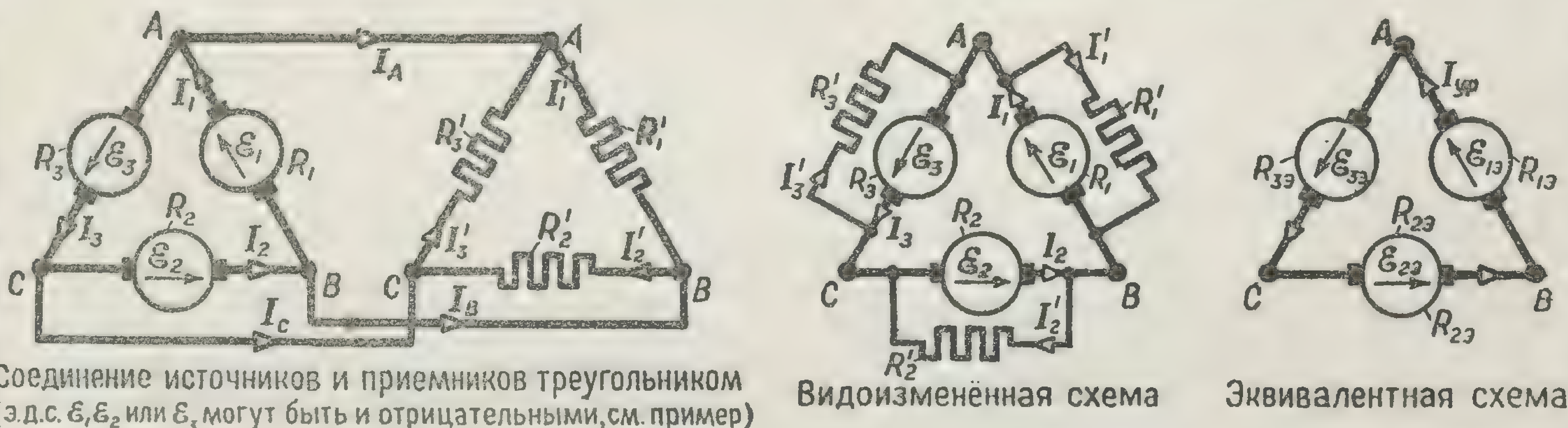
Второй закон Кирхгофа

Замкнутый контур в разветвленной цепи

$\sum_o \mathcal{E} = \sum_o IR$ в

В замкнутом контуре алгебраическая сумма э.д.с. равна алгебраической сумме падений напряжения

Второй закон кирхгофа



Соединение источников и приемников треугольником (э.д.с. $\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_2$ или $\mathcal{E}_3$ могут быть и отрицательными, см. пример)

Видоизменённая схема

Эквивалентная схема

$R_{1э} = \frac{R_1 \cdot R_1'}{R_1 + R_1'}$ ом $\quad \mathcal{E}_{1э} = \frac{\mathcal{E}_1 g_1}{g_1 + g_1'} = R_{1э} \cdot \frac{\mathcal{E}_1}{R_1}$ в

Сопротивление и э.д.с. эквивалентного источника

$I_{ур} = \frac{\mathcal{E}_{1э} + \mathcal{E}_{2э} + \mathcal{E}_{3э}}{R_{1э} + R_{2э} + R_{3э}}$ а

Уравнительный ток

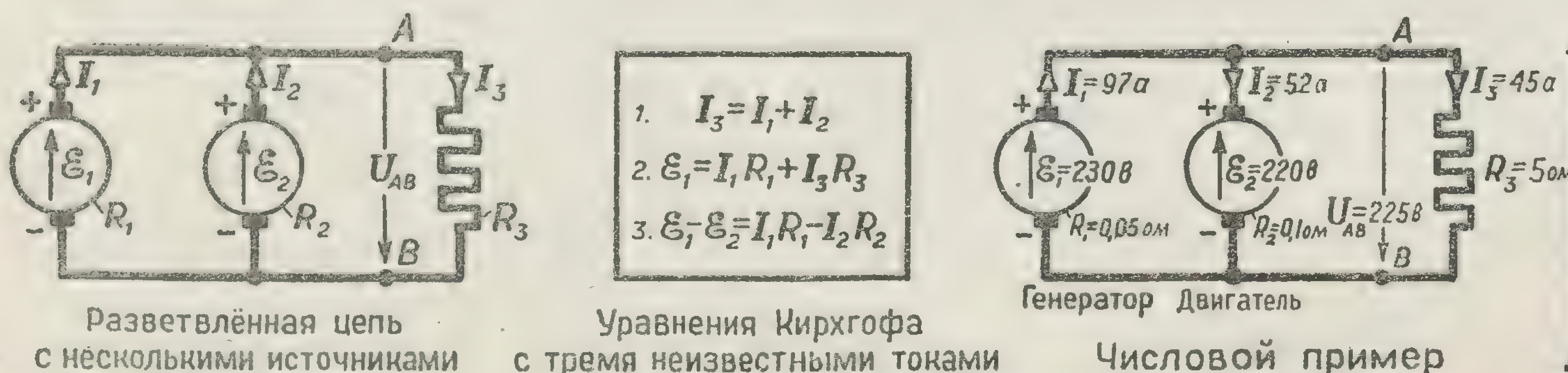
$U_{AB} = \mathcal{E}_{1э} - I_{ур} R_{1э}$ в $\quad I_1 = \frac{\mathcal{E}_1 - U_{AB}}{R_1}; \; I_1' = \frac{U_{AB}}{R_1'}$ а

Напряжения и токи в исходной схеме



Числовой пример

МЕТОД ЗАМЕНЫ НЕСКОЛЬКИХ ВЕТВЕЙ ОДНОЙ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ



1. $I_3 = I_1 + I_2$
2. $\mathcal{E}_1 = I_1R_1 + I_3R_3$
3. $\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = I_1R_1 - I_2R_2$

Разветвлённая цепь с несколькими источниками

Уравнения Кирхгофа с тремя неизвестными токами

Числовой пример

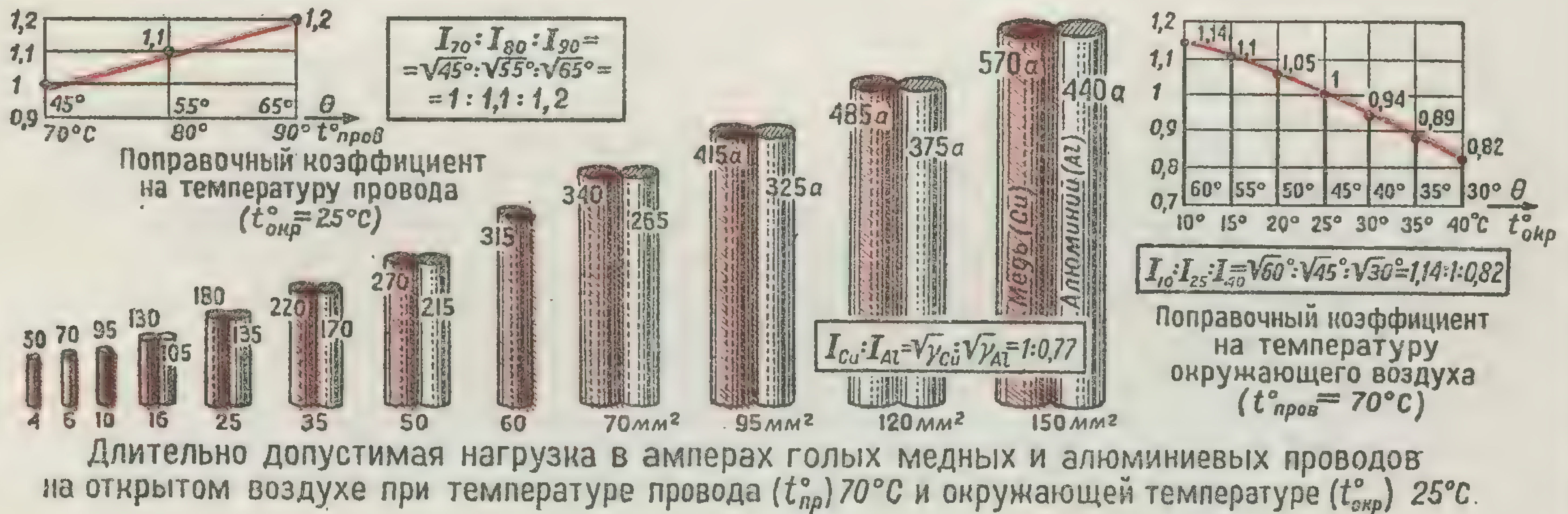
МЕТОД УРАВНЕНИЙ КИРХГОФА

Э.И. Расовский

Худ. А.Меньшиков

НАГРЕВ И ОХЛАЖДЕНИЕ ПРОВОДОВ





Длительно допустимая нагрузка в амперах голых медных и алюминиевых проводов на открытом воздухе при температуре провода ($t^\circ_{пр}$) 70°C и окружающей температуре ($t^\circ_{окр}$) 25°C.



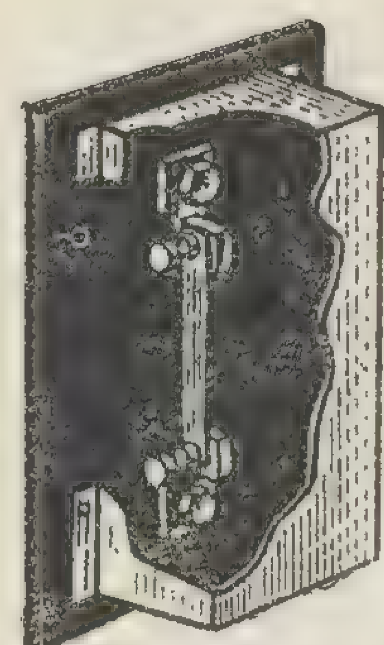
Длительно допустимая нагрузка ($I_{доп}$) в амперах изолированных медных проводов и номинальный ток ($I_{вст}$) плавких предохранителей, их защищающих. Предельная температура провода ($t^\circ_{пров}$) 55°C. Окружающая температура ($t^\circ_{окр}$) 25°C.

СЕЧЕНИЕ ПРОВОДОВ, ВЫБРАННЫХ ПО ДОПУСТИМОМУ НАГРЕВУ, ПРОВЕРЯЕТСЯ ЗАТЕМ НА ДОПУСТИМУЮ ПОТЕРЮ НАПРЯЖЕНИЯ

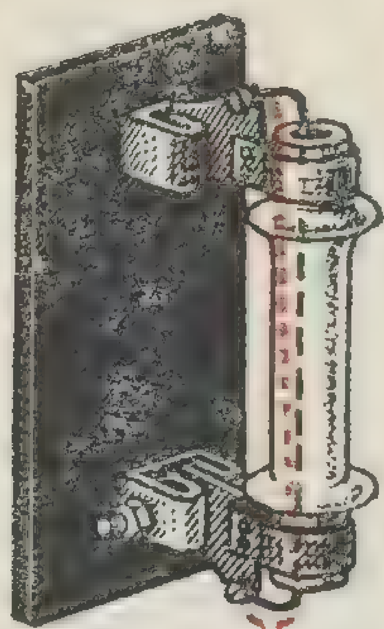
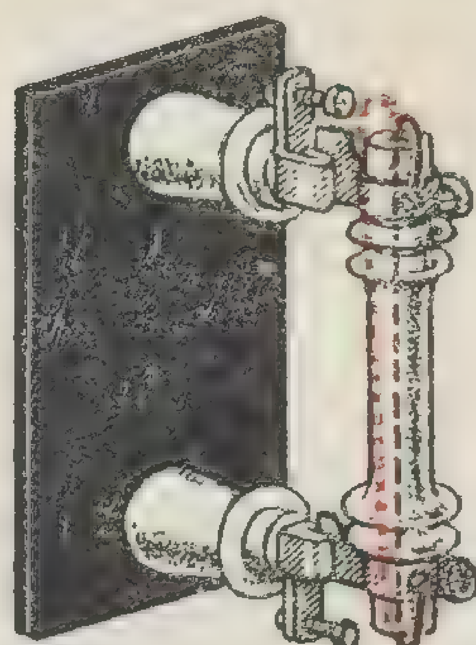
Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

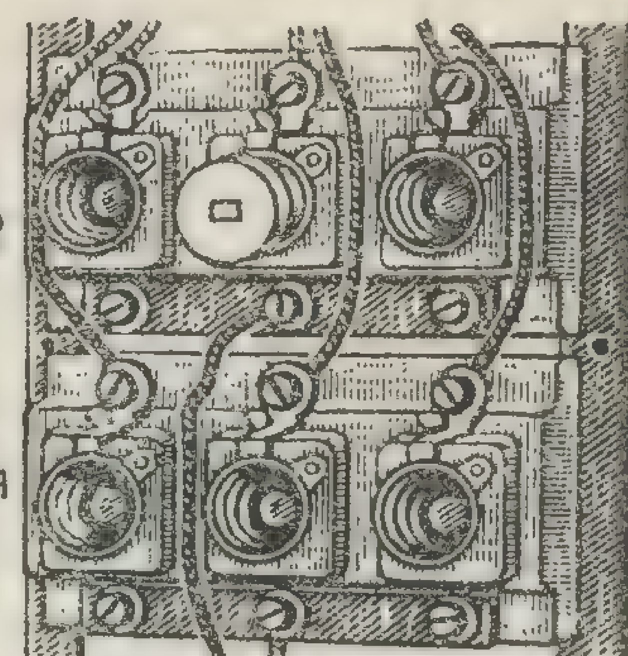
ПЛАВКИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ


Пластинчатый

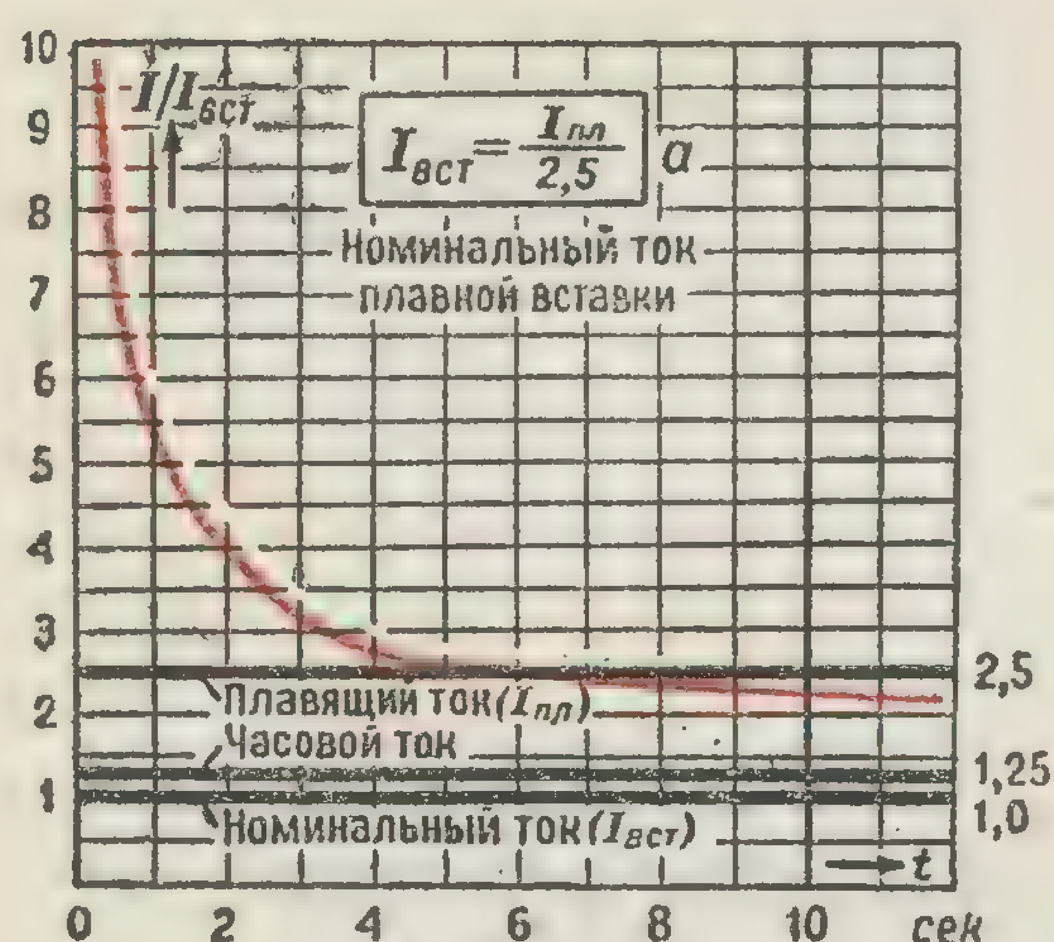
Плавкая вставка



Трубчатые

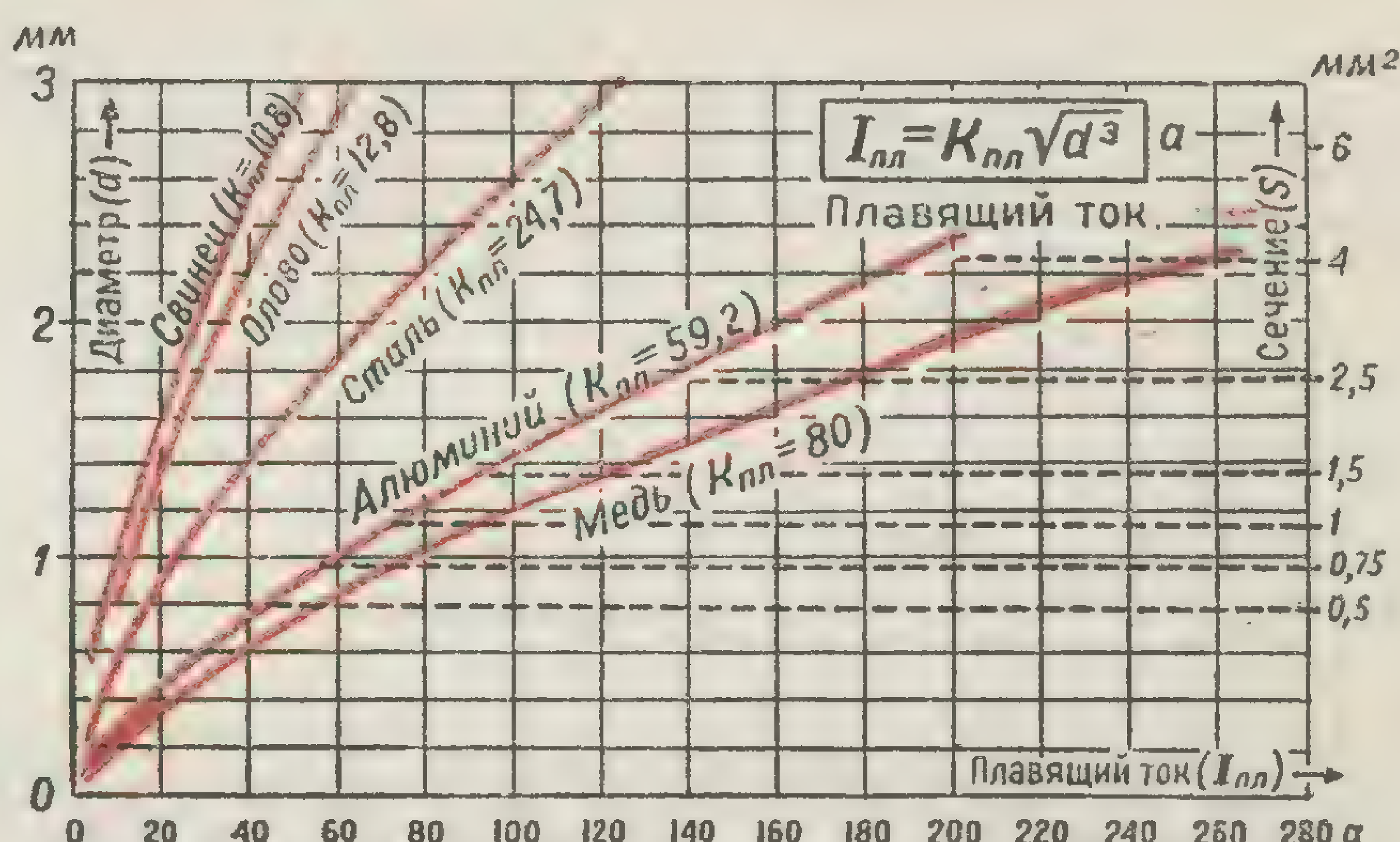

Вставка пробочного предохранителя


Групповой щиток пробочных предохранителей

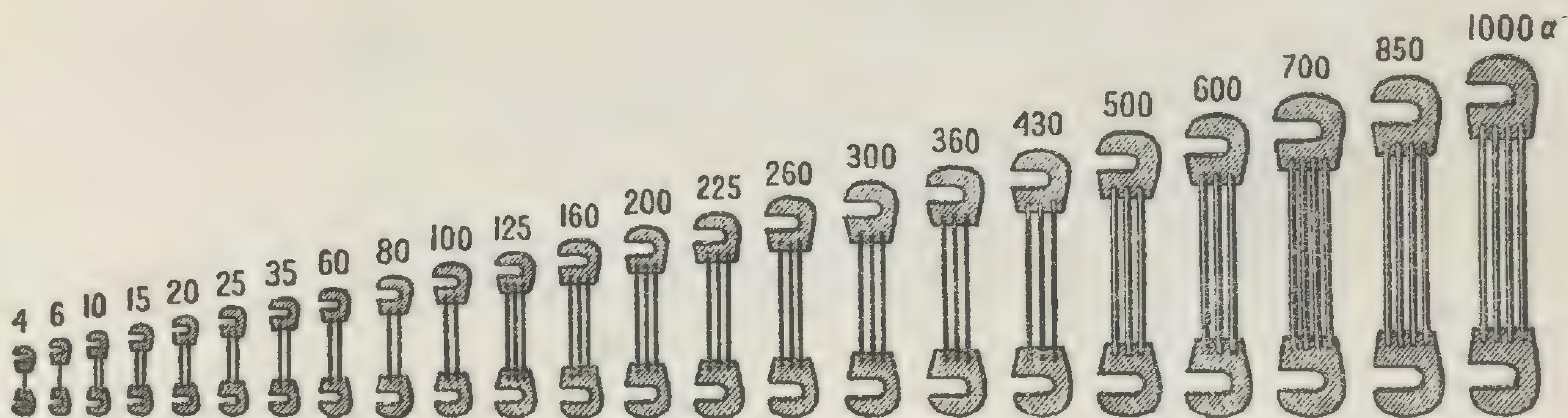
ПРЕДОХРАНИТЕЛИ



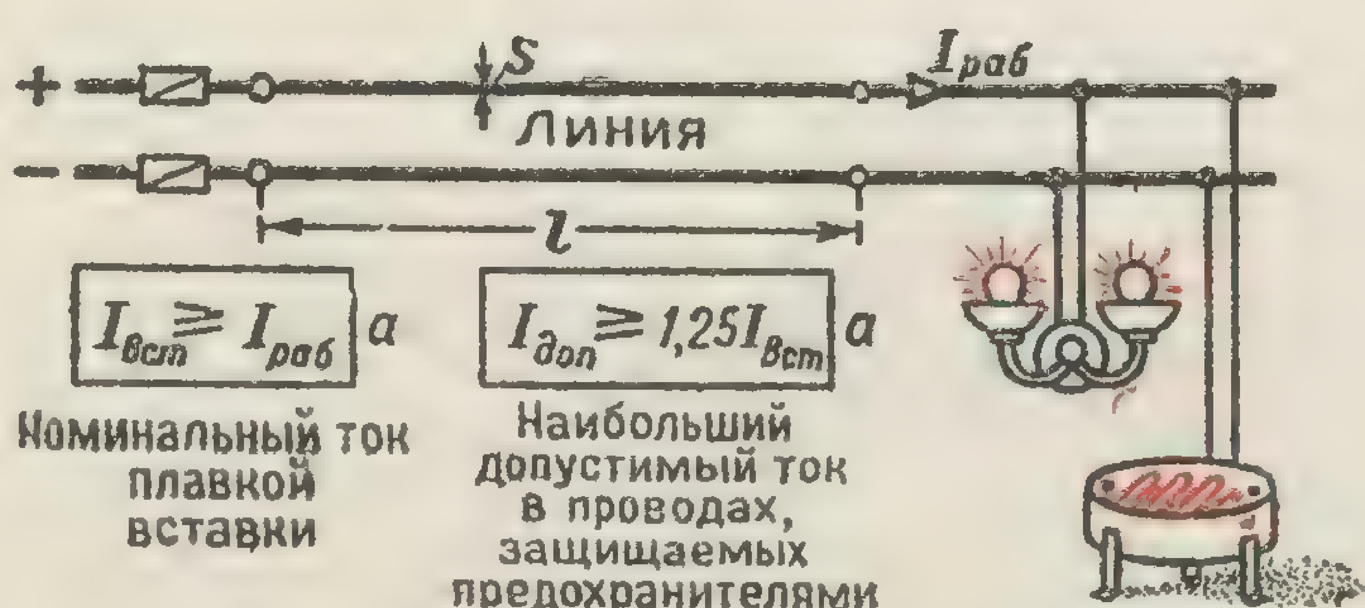
Характеристика плавкого предохранителя



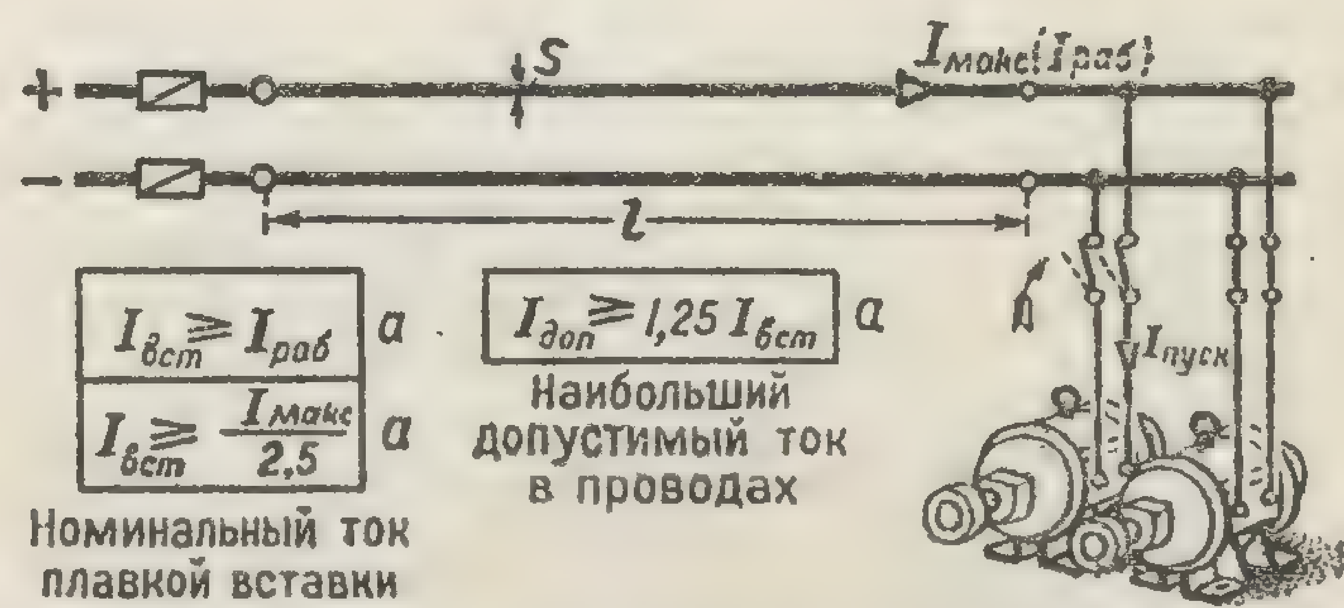
Величина плавящего тока для проволок различного диаметра из различных материалов



НОМИНАЛЬНЫЕ ТОКИ ПЛАВКИХ ВСТАВОК В АМПЕРАХ



Спокойная нагрузка



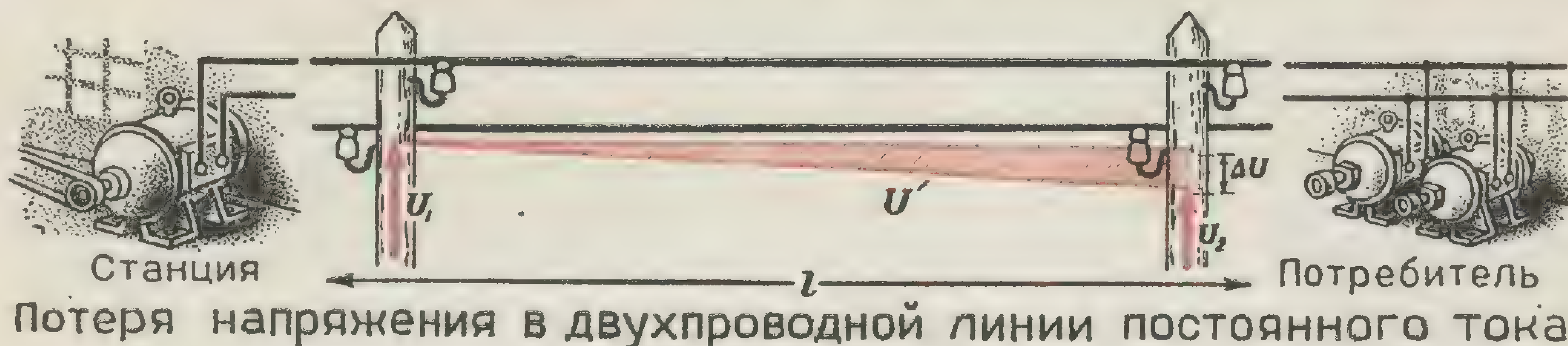
Нагрузка, сопровождаемая толчками тока

ВЫБОР ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

ПОТЕРЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОВОДАХ



Потеря напряжения в двухпроводной линии постоянного тока

$$\Delta U = U_1 - U_2 = IR = I\frac{2l}{\gamma S} \text{ в}$$

$$\Delta U\% = \frac{U_1 - U_2}{U_1}100 = \frac{200\,Pl}{\gamma S U^2}\ \%$$

Потеря напряжения

Двухпроводная линия.

Трехпроводная линия

$S_0 = 1/3 \div 1/2\,S$

$$\Delta P = I^2 R = I^2\frac{2l}{\gamma S} \text{ вт}$$

$$\Delta P\% = \frac{I^2 R}{UI}100 = \Delta U\%\ \%$$

Потеря мощности

$$S = \frac{2I \cdot l}{\gamma \cdot \Delta U} \text{ мм}^2$$

Сечение проводов

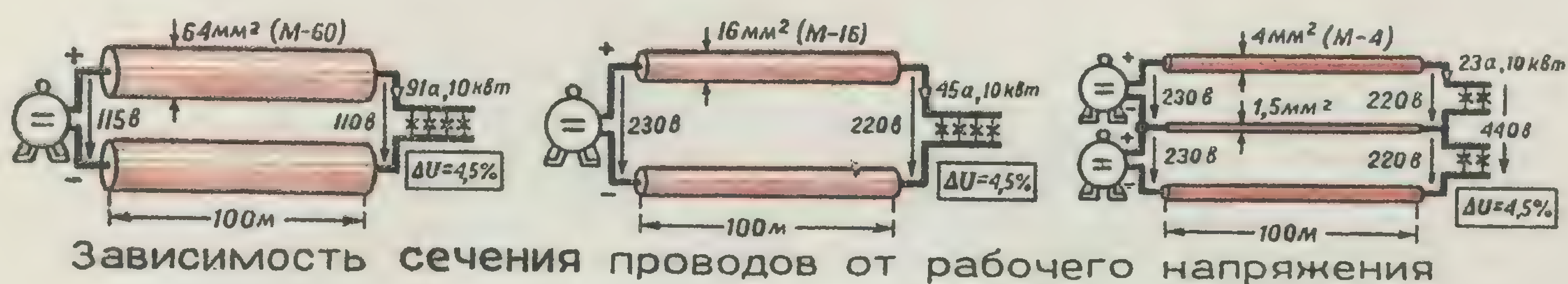
$$S_{Cu} : S_{Al} : S_{Fe} = \frac{1}{\gamma_{Cu}} : \frac{1}{\gamma_{Al}} : \frac{1}{\gamma_{Fe}} = 1:1{,}7:8$$

Отношение сечений медных, алюминиевых и стальных проводов при одинаковой потере напряжения

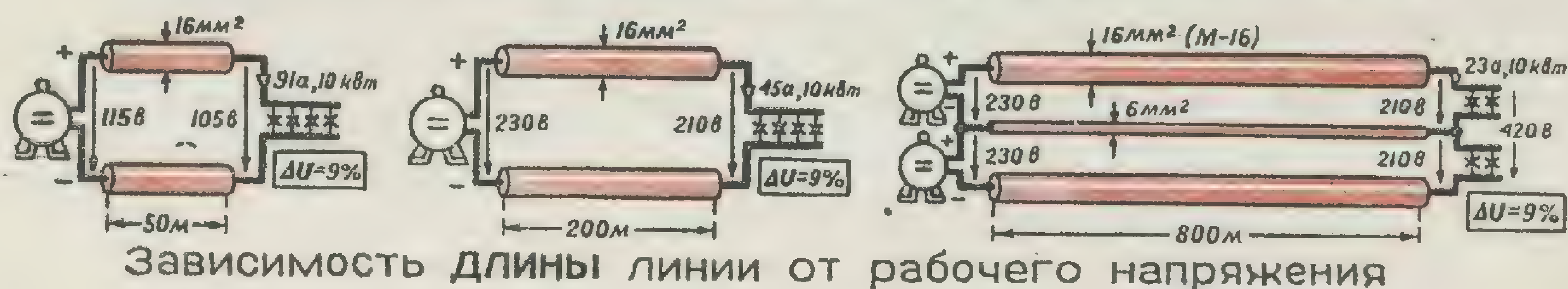
$$S = \frac{200\,P \cdot l}{\gamma \cdot \Delta U\% \cdot U^2} \text{ мм}^2$$

Сечение проводов

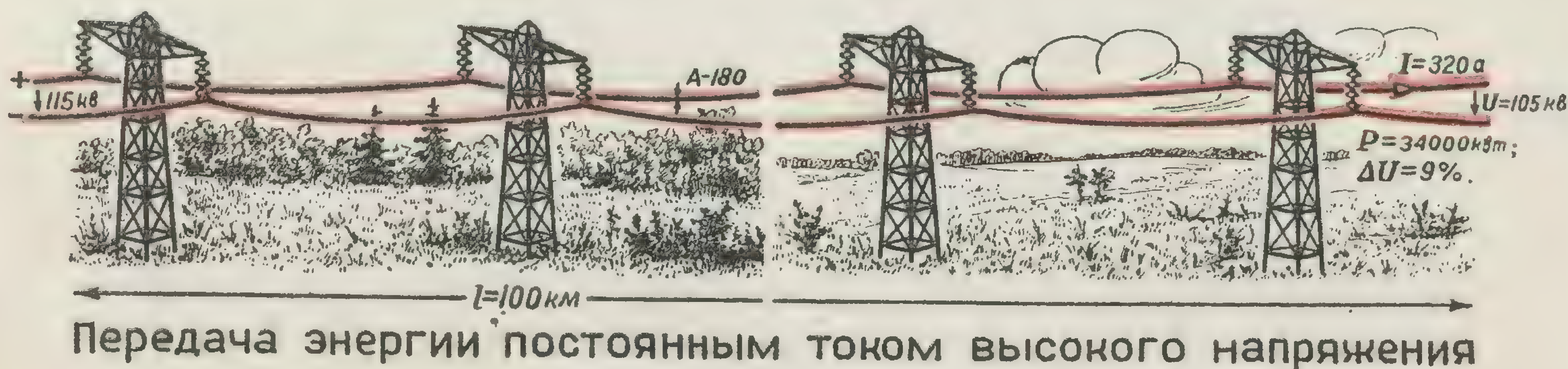
• ПОЛУЧЕННОЕ СЕЧЕНИЕ ПРОВЕРЯЕТСЯ ПО ТАБЛИЦАМ НА НАГРЕВ •



Зависимость **сечения** проводов от рабочего напряжения



Зависимость **длины** линии от рабочего напряжения



Передача энергии постоянным током высокого напряжения

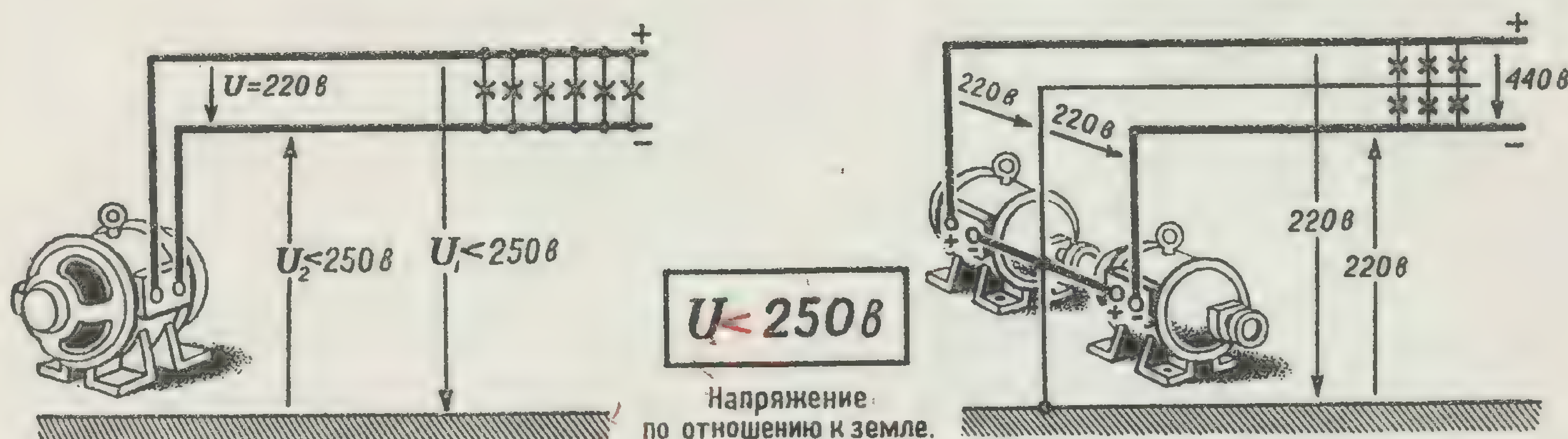
Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

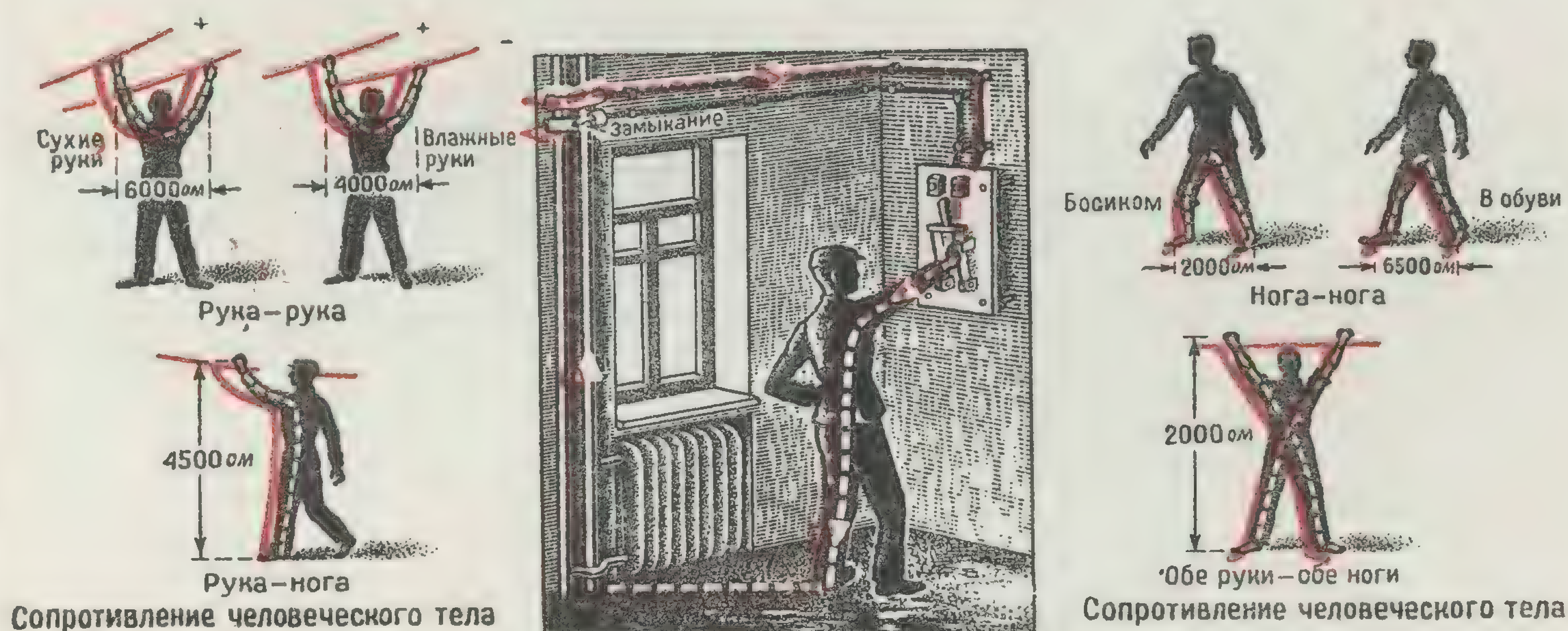
ВЫСОКОЕ И НИЗКОЕ НАПРЯЖЕНИЯ



УСТАНОВКИ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ



УСТАНОВКИ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ



$I_{оп} \geq 50\,ма$

Ток, опасный для жизни

$I_{см} \geq 100\,ма$

Смертельный ток

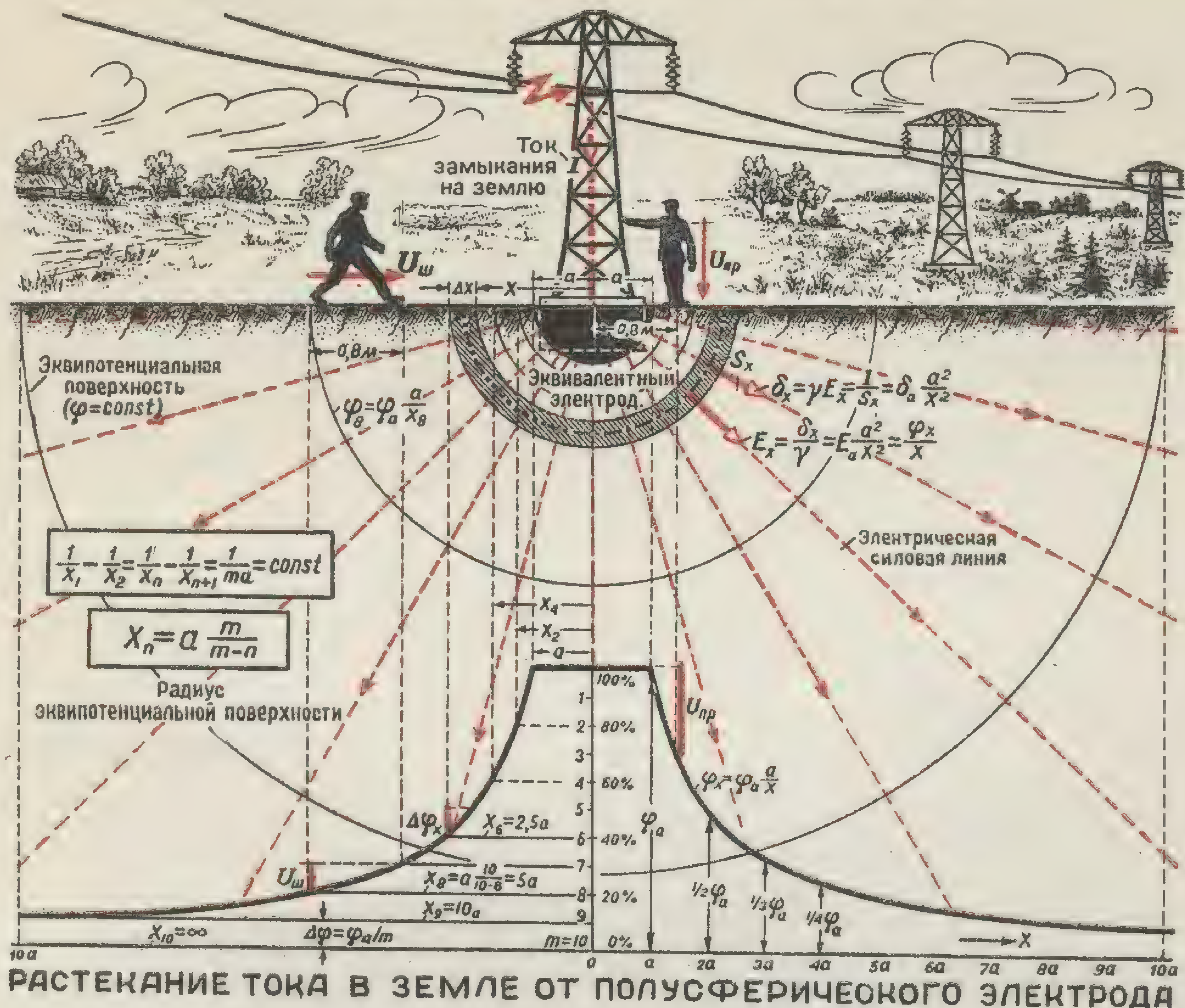
80% поражений электрическим током приходится на установки низкого напряжения

ПОРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ШАГОВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ



РАСТЕКАНИЕ ТОКА В ЗЕМЛЕ ОТ ПОЛУСФЕРИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОДА

$$\Delta R_x = \frac{\Delta x}{\gamma \cdot S_x} = \frac{\Delta x}{\gamma \cdot 2\pi (x + \frac{\Delta x}{2})^2} = \frac{1}{2\pi\gamma}\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x+\Delta x}\right) \text{ ом}$$

Сопротивление полусферического слоя почвы.

$$R_a = \sum_a^\infty \Delta R_x = \frac{1}{2\pi\gamma a} = \frac{a}{\gamma \cdot 2\pi a^2} \text{ ом}$$

Сопротивление растеканию от полусферического электрода.



Удельная проводимость (γ') грунтов различной влажности.

$$\Delta\varphi_x = E_x \cdot \Delta X = \frac{\delta_x}{\gamma} \cdot \Delta X = I \cdot \Delta R_x = \frac{1}{2\pi\gamma}\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x+\Delta x}\right) \text{ в}$$

Падение потенциала вдоль силовой линии

$$\varphi_a = \sum_a^\infty E_x \cdot \Delta X = \frac{I}{2\pi\gamma a} = IR_a \text{ в}$$

Потенциал заземлителя.

$$\varphi_x = \sum_x^\infty E_x \cdot \Delta X = \varphi_a \frac{a}{x} \text{ в}$$

Потенциал произвольной точки.

$$U_ш = \frac{I}{2\pi\gamma}\left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x+0,8}\right) \text{ в}$$

Шаговое напряжение

$$U_{пр} = \frac{I}{2\pi\gamma}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{0,8}\right) = \varphi_a\left(1 - \frac{a}{0,8}\right) \text{ в}$$

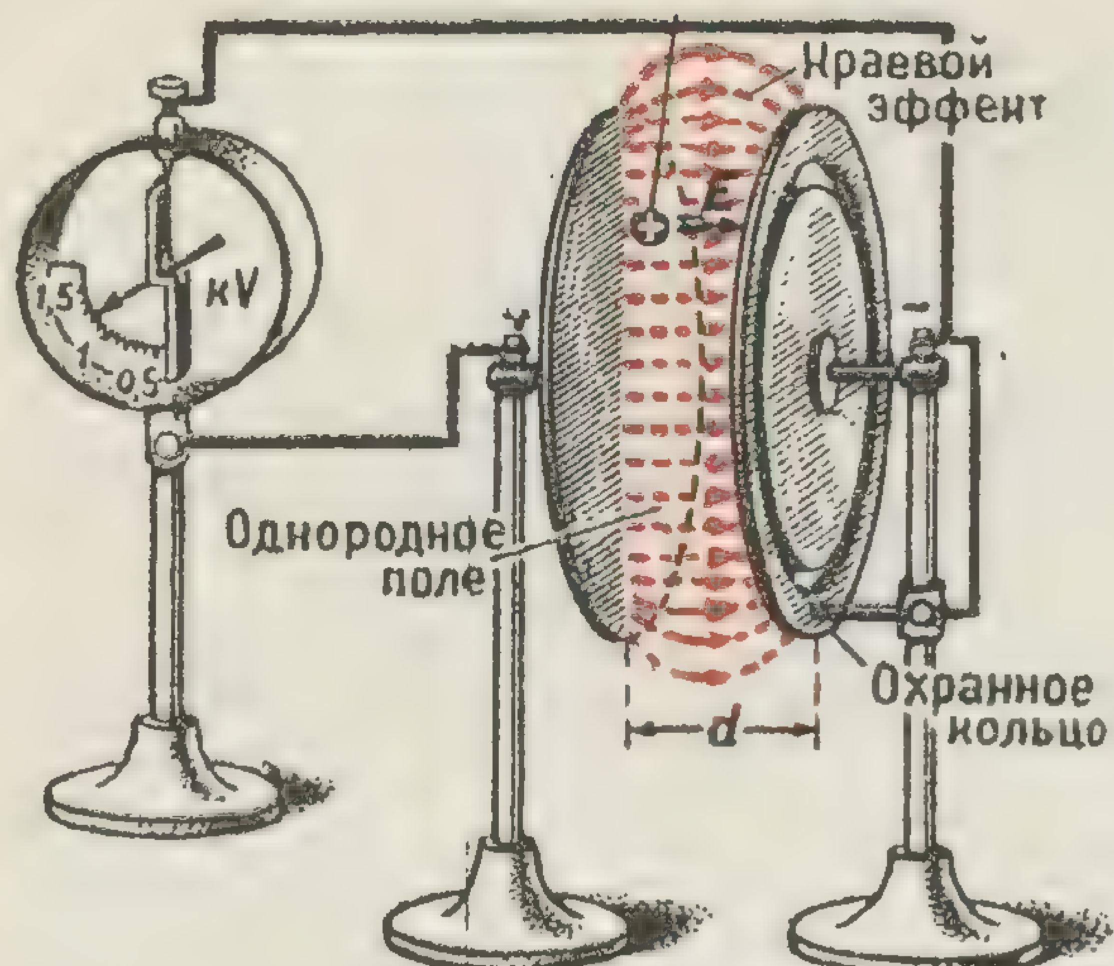
Напряжение прикосновения

заземляющие устройства должны быть рассчитаны на допустимое шаговое напряжение и напряжение прикосновения

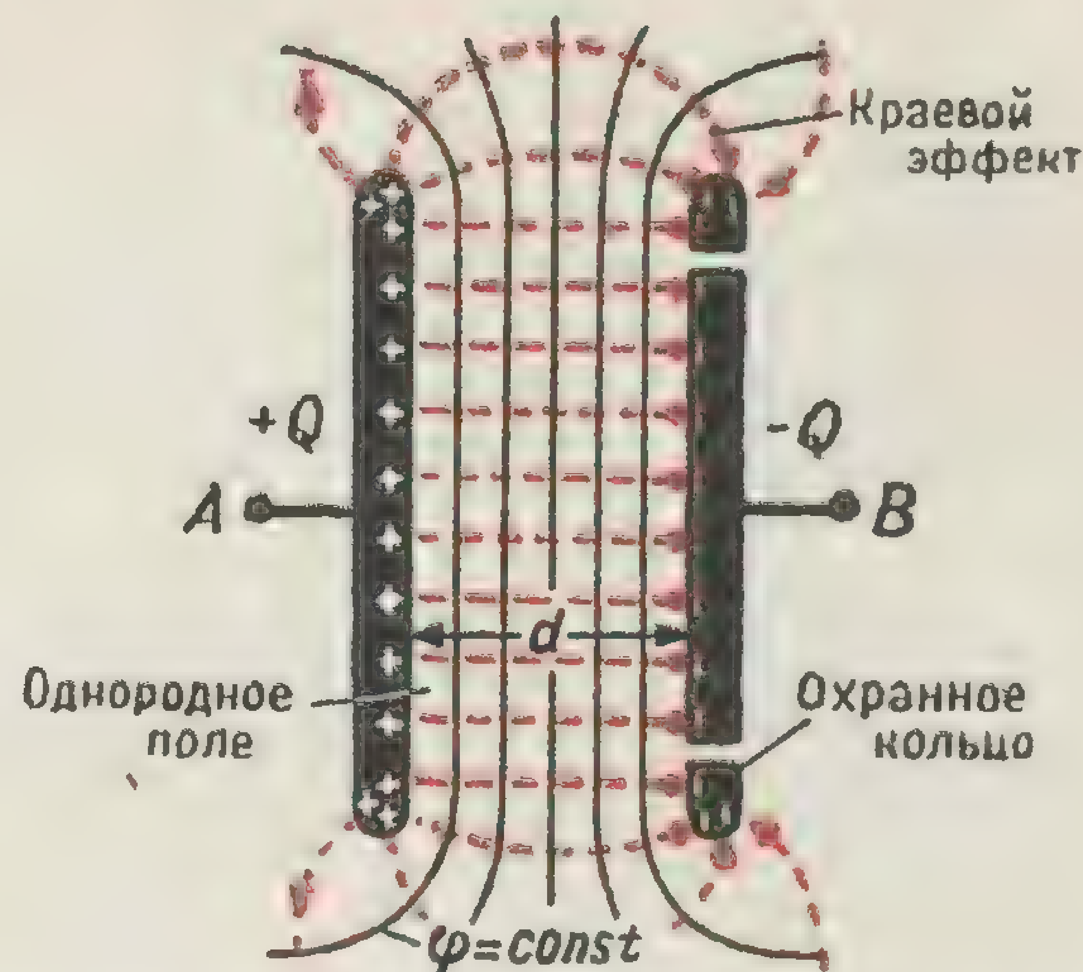
Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

ОДНОРОДНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

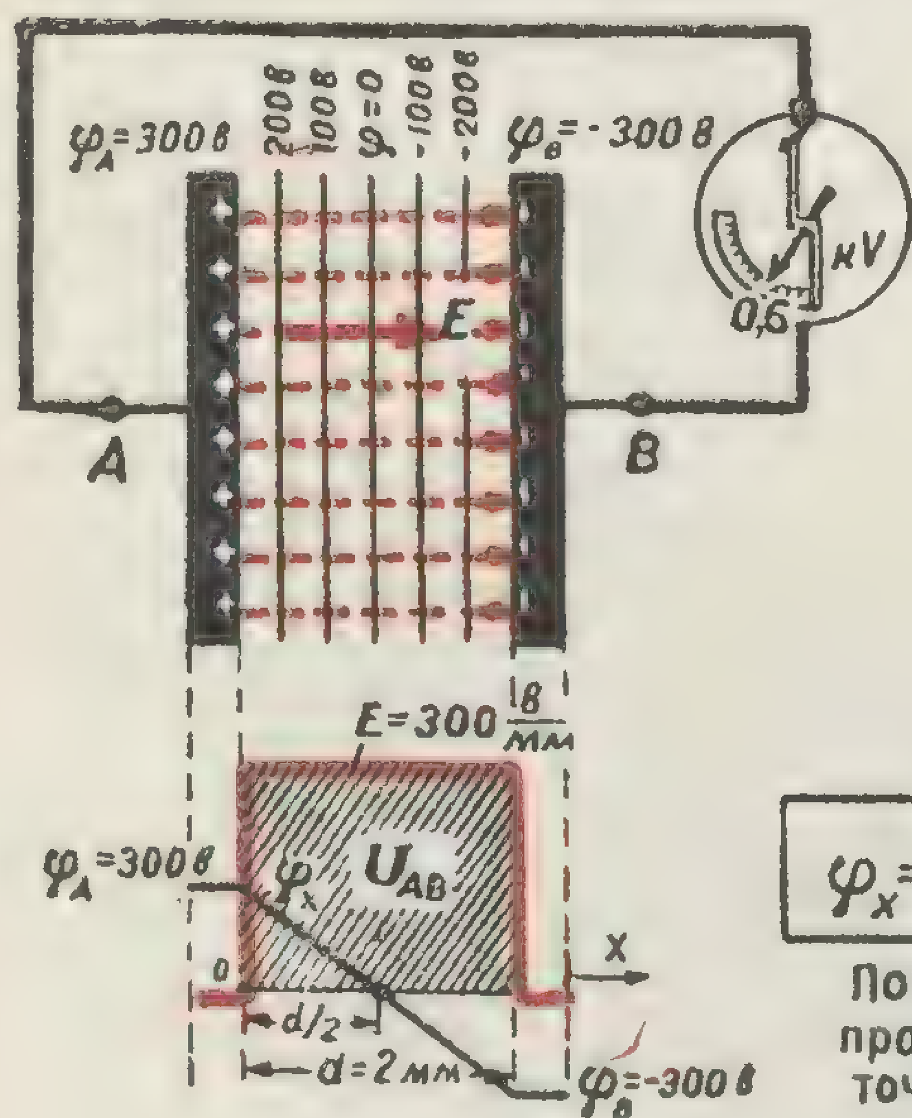


Плоский воздушный конденсатор



Поле плоского конденсатора с охранным кольцом

Конденсатор — совокупность двух проводников, разделенных диэлектриком и заряжаемых равными и противоположными по знаку электрическими зарядами



$$E=\frac{U_{AB}}{d}=Const \quad \frac{в}{м}\left(\frac{в}{мм}\right)$$

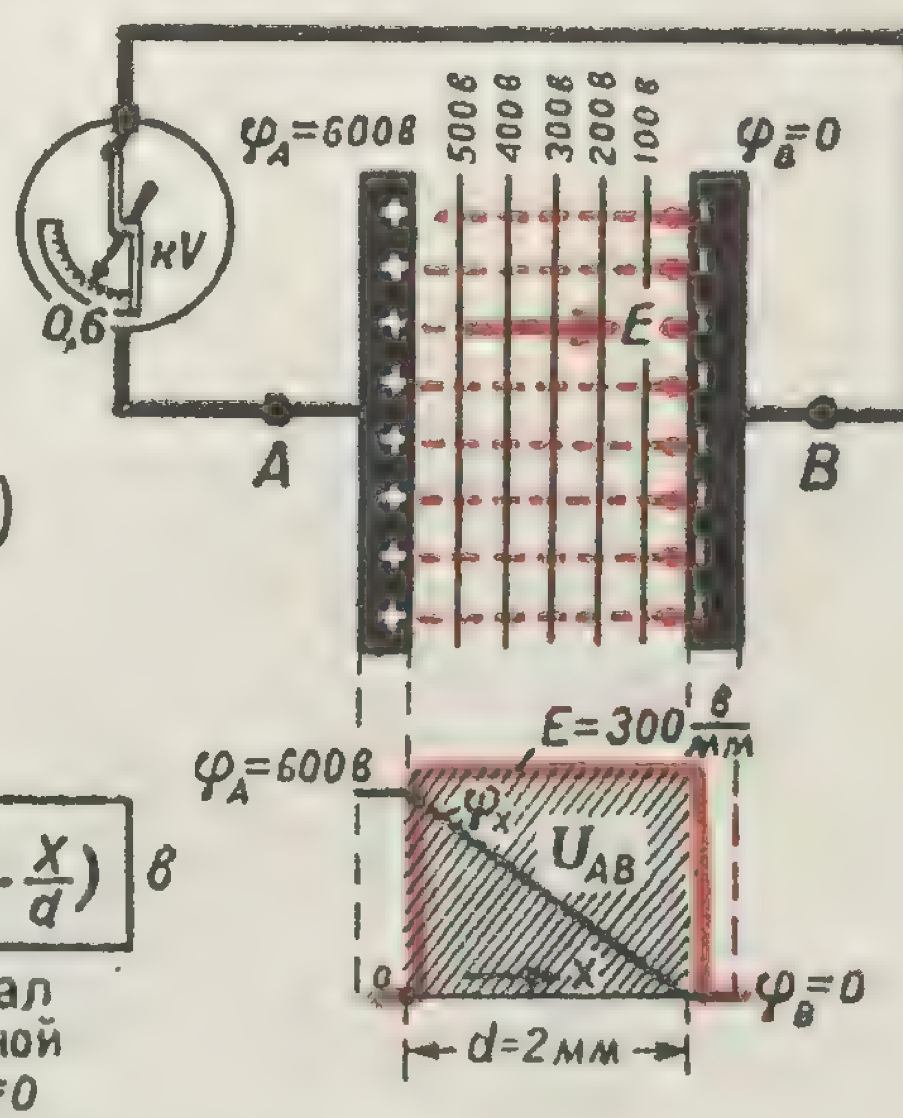
Напряженность поля

$$\varphi_x=\frac{U_{AB}}{2}\left(1-\frac{2x}{d}\right) \; в$$

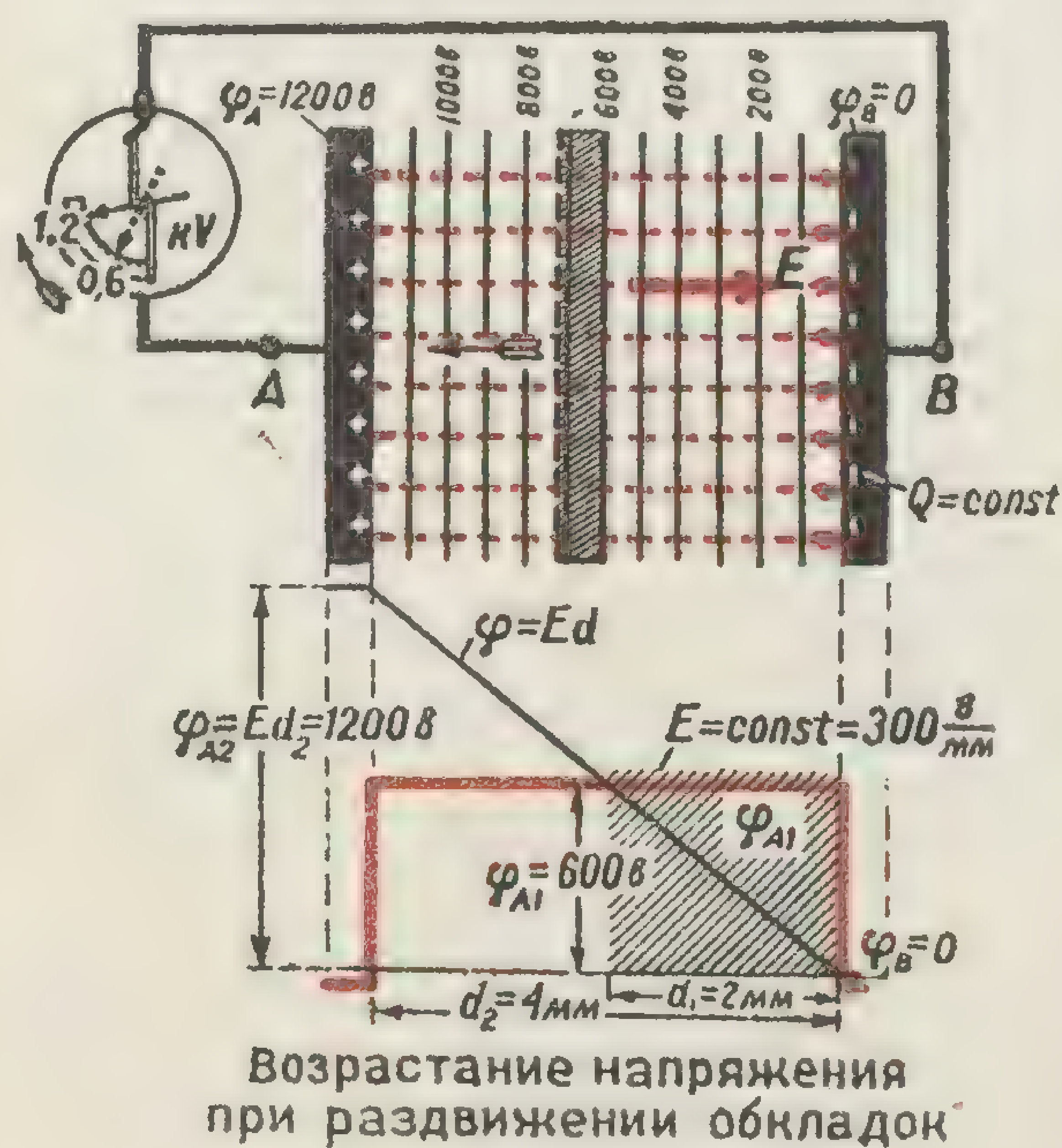
Потенциал произвольной точки, $\varphi_{d/2}=0$

$$\varphi_x=U_{AB}\left(1-\frac{x}{d}\right) \; в$$

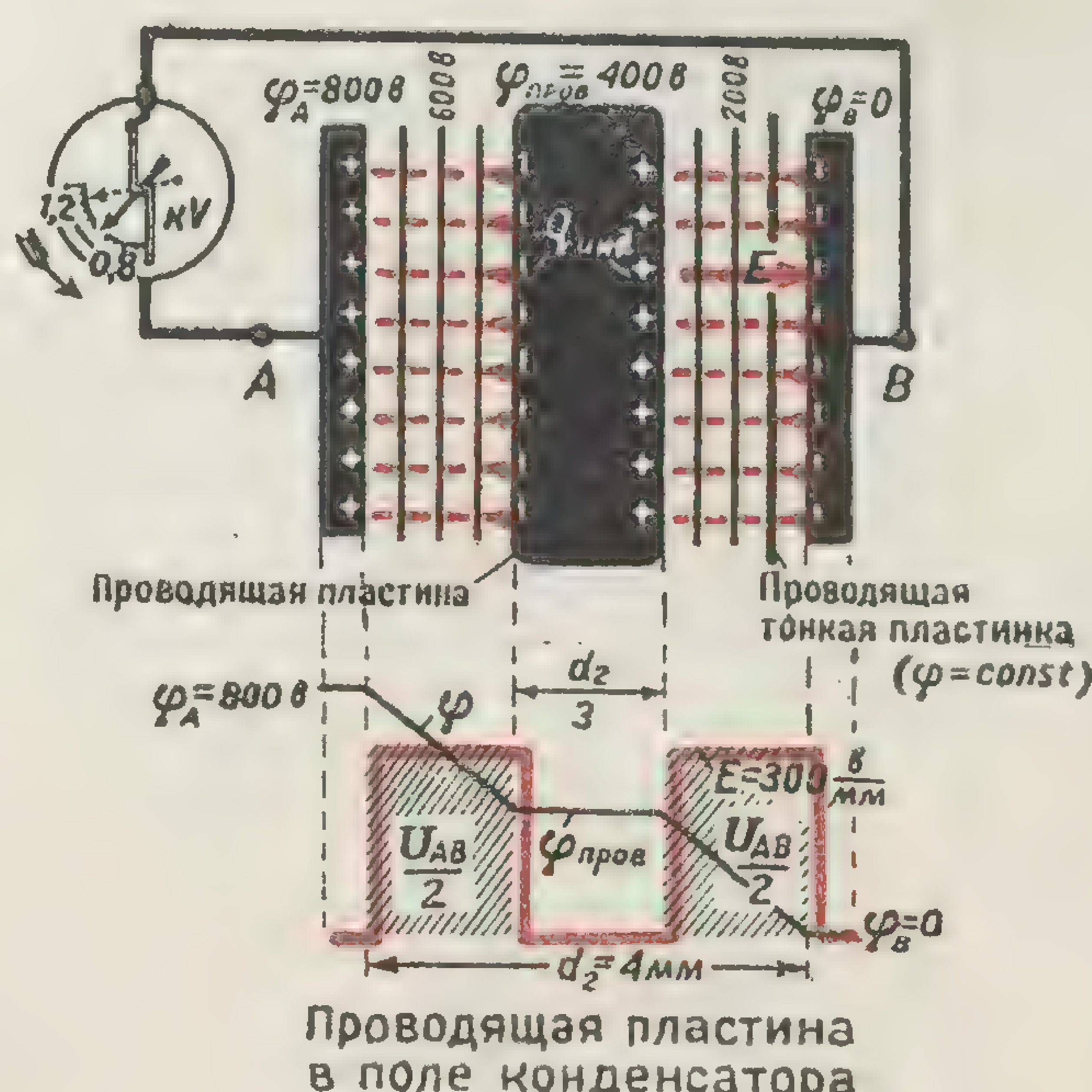
Потенциал произвольной точки, $\varphi_B=0$



Однородное поле плоского конденсатора



Возрастание напряжения при раздвижении обкладок



Проводящая пластина в поле конденсатора

Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

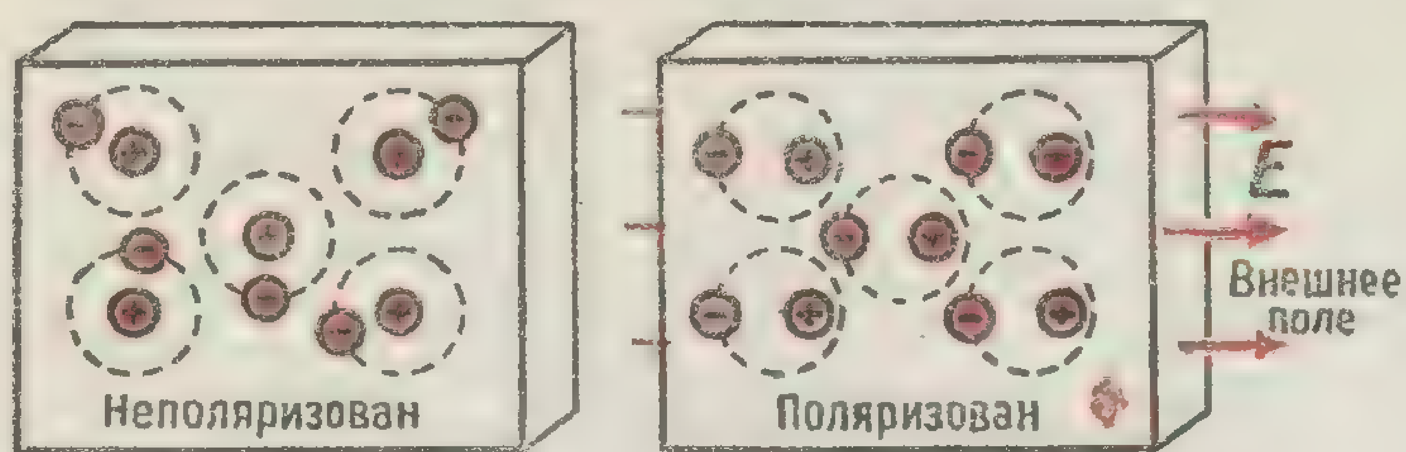


Схема диэлектрика с упругими диполями

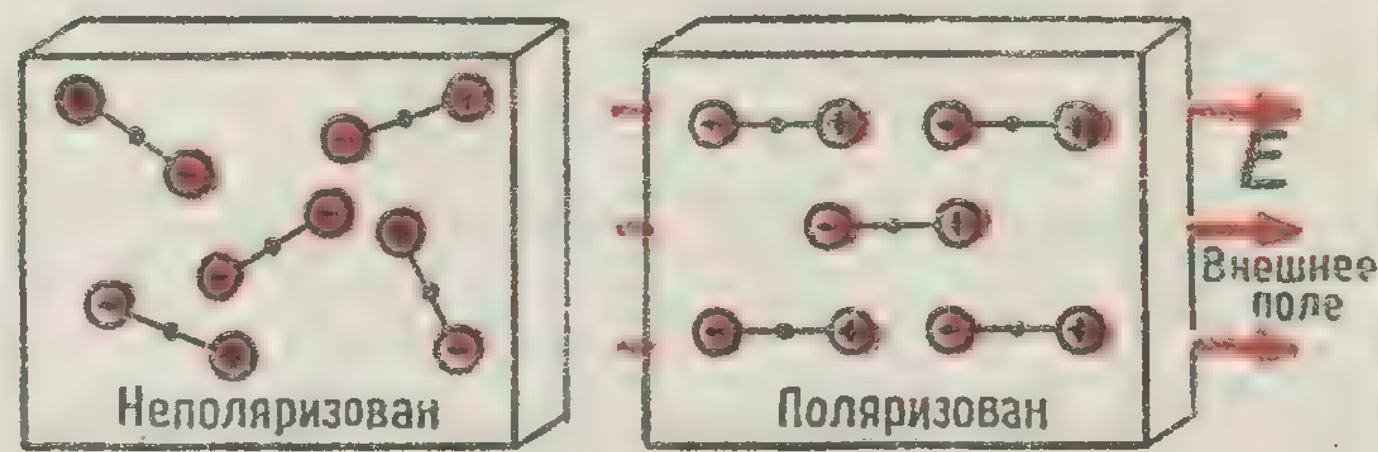


Схема диэлектрика с твердыми диполями

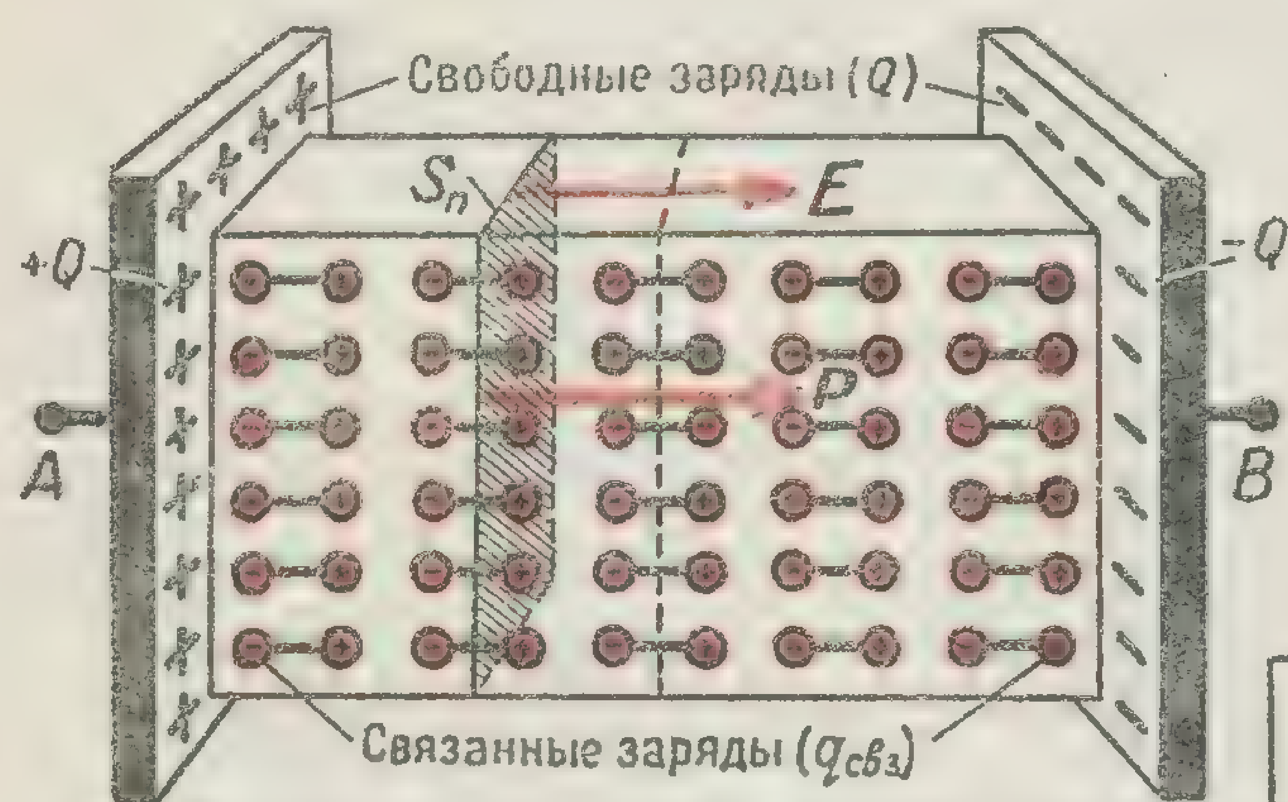


Схема поляризации диэлектрика в однородном поле

$$\bar{P} = \frac{q_{св3}}{S_n}\bar{l}^{\circ} \ \frac{к}{м^2}$$

Вектор поляризации

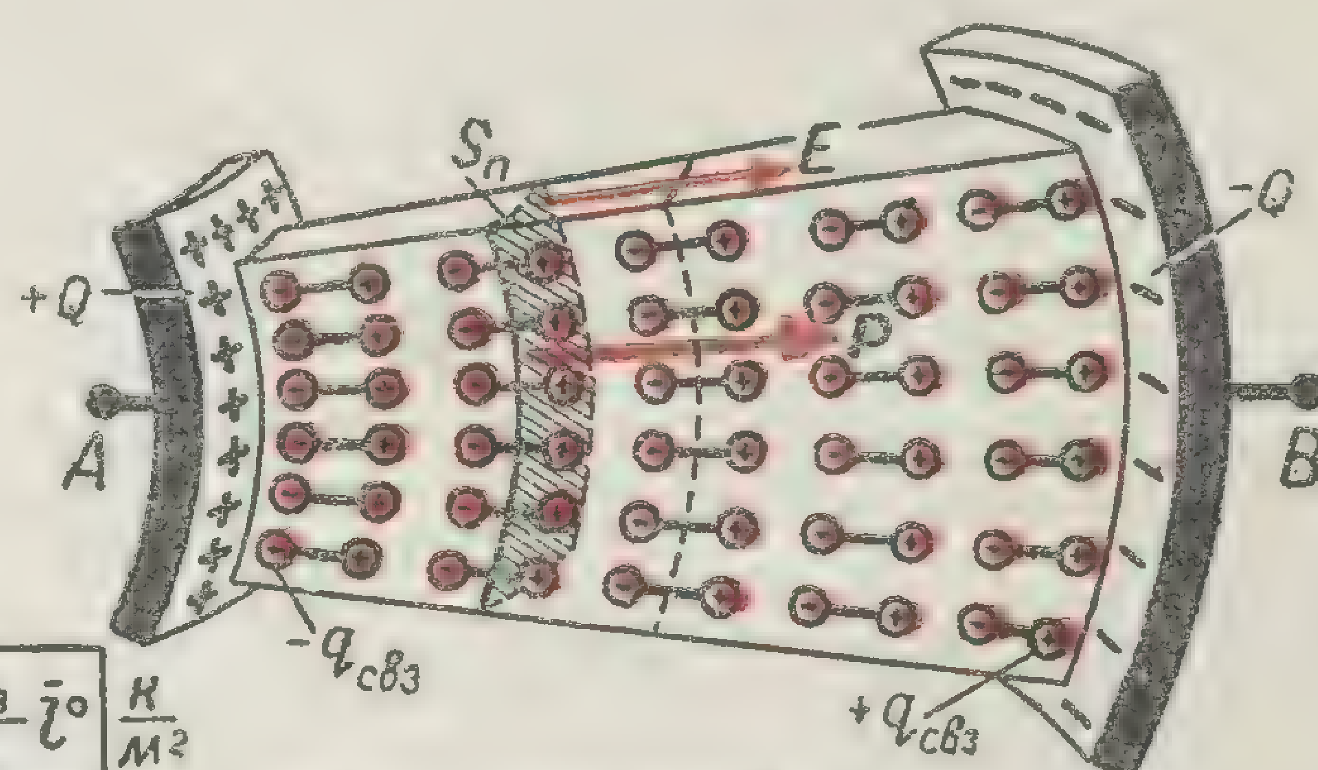


Схема поляризации диэлектрика в сферическом поле

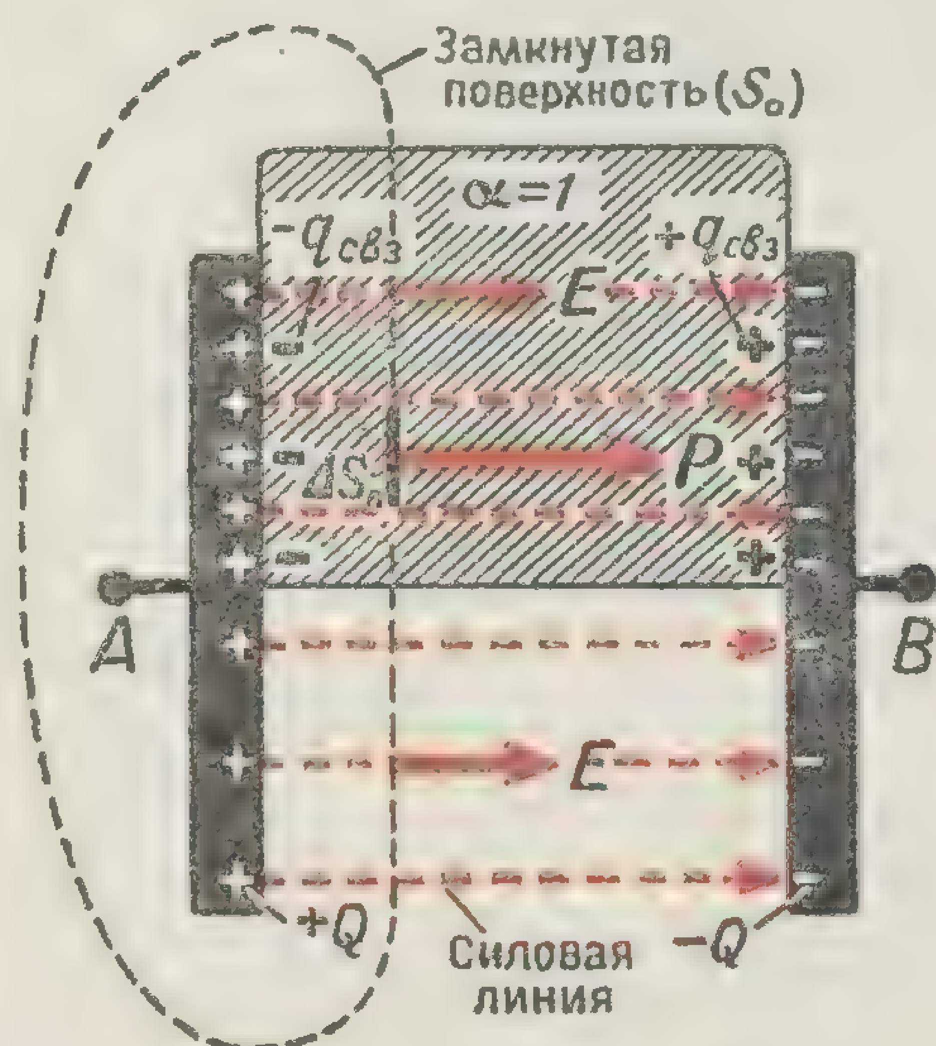
$$\bar{P} = \alpha\varepsilon_0\bar{E} \ \frac{к}{м^2}$$

Зависимость поляризации от напряженности поля

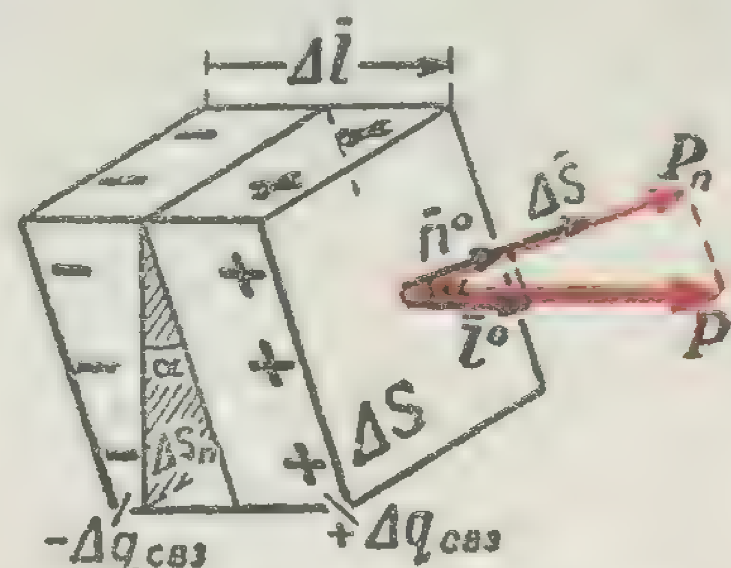
Вектор поляризации характеризует изменения происходящие в диэлектрике под влиянием внешнего электрического поля, и представляет собою перемещенный связанный заряд, отнесенный к единице поверхности, нормальной к этому перемещению

$$\alpha = \frac{\bar{P}}{\varepsilon_0\bar{E}}$$

Коэффициент поляризации (поляризуемость) диэлектрика



Многослойный диэлектрик в однородном поле, $U_{AB}=Const$ (параллельное соединение слоев) Сравни табл. 3

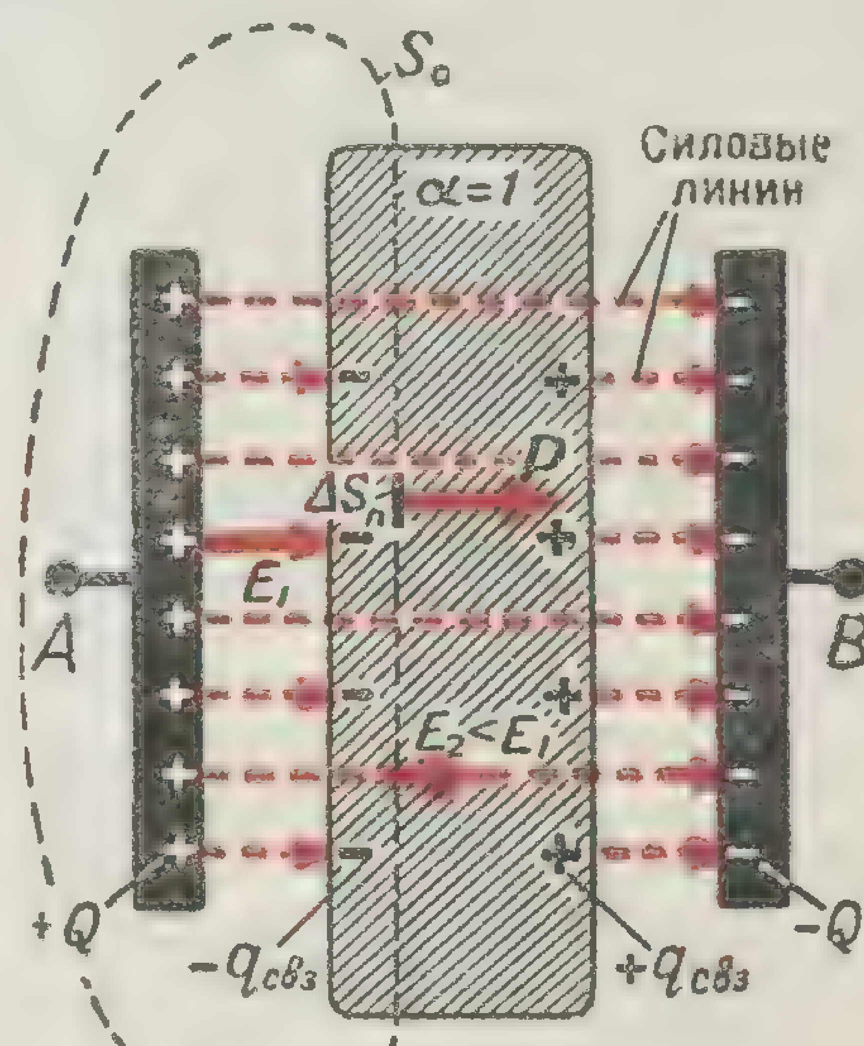


$$\bar{P}\cdot\Delta\bar{S} = P_n\cdot\Delta S = P\cdot\Delta S_n \ к$$

Поток вектора поляризации сквозь элементарную поверхность

$$\sum_0 \bar{P}\cdot\Delta\bar{S} = -\sum_0 q_{св3} \ I$$

Поток вектора поляризации сквозь замкнутую поверхность



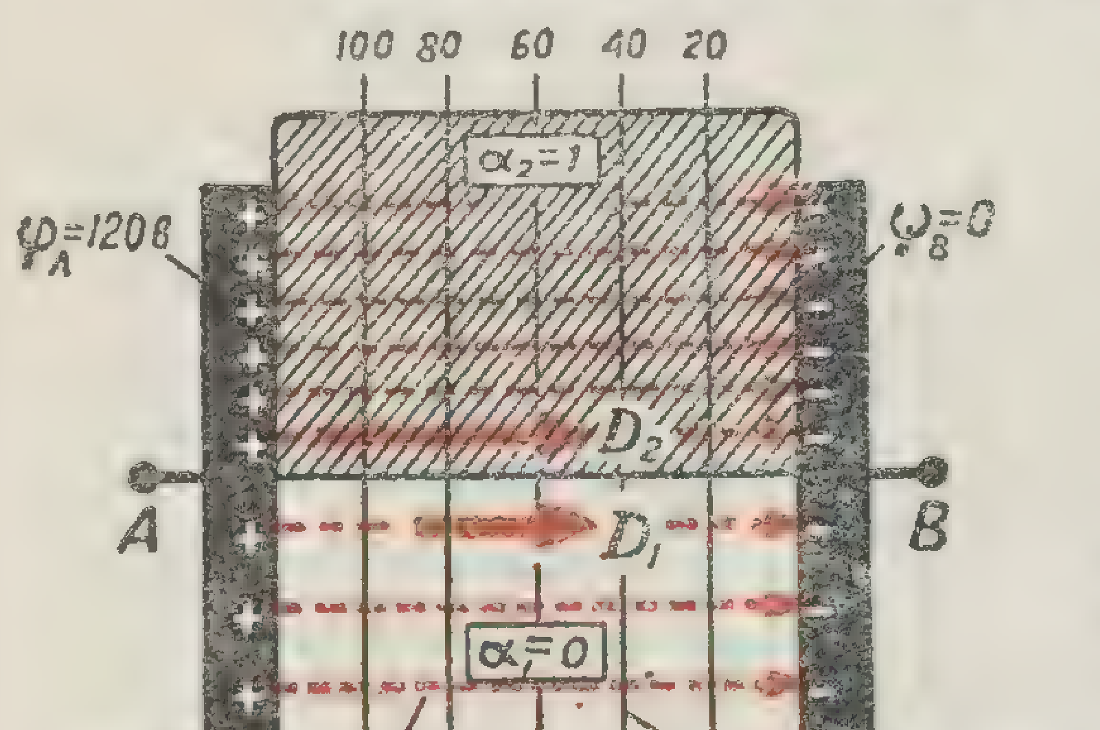
Многослойный диэлектрик в однородном поле, $U_{AB}=Const$ (последовательное соединение слоев) Сравни табл.3

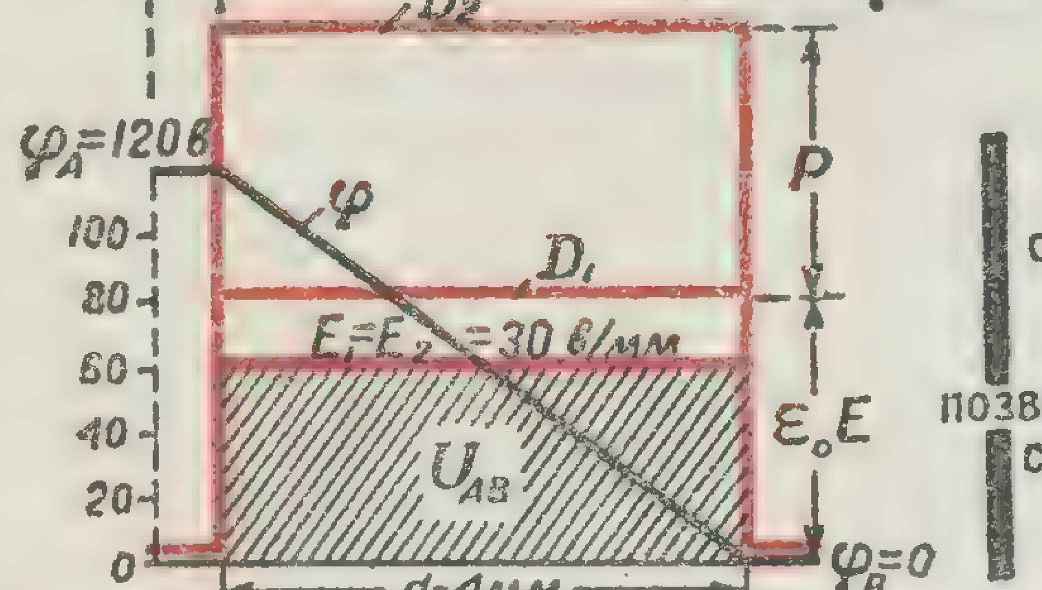
Поток вектора поляризации сквозь произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме связанных зарядов, заключенных внутри этой поверхности

Э.И.Р. совский

Худ. А.Меньшиков

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СМЕЩЕНИЕ





Многослойный диэлектрик в однородном поле (параллельное соединение слоев)

Ср. табл. 2

$$\sum_{0} \varepsilon_0 \bar{E}\cdot\Delta\bar{S}=\sum(Q+q_{св})$$

или

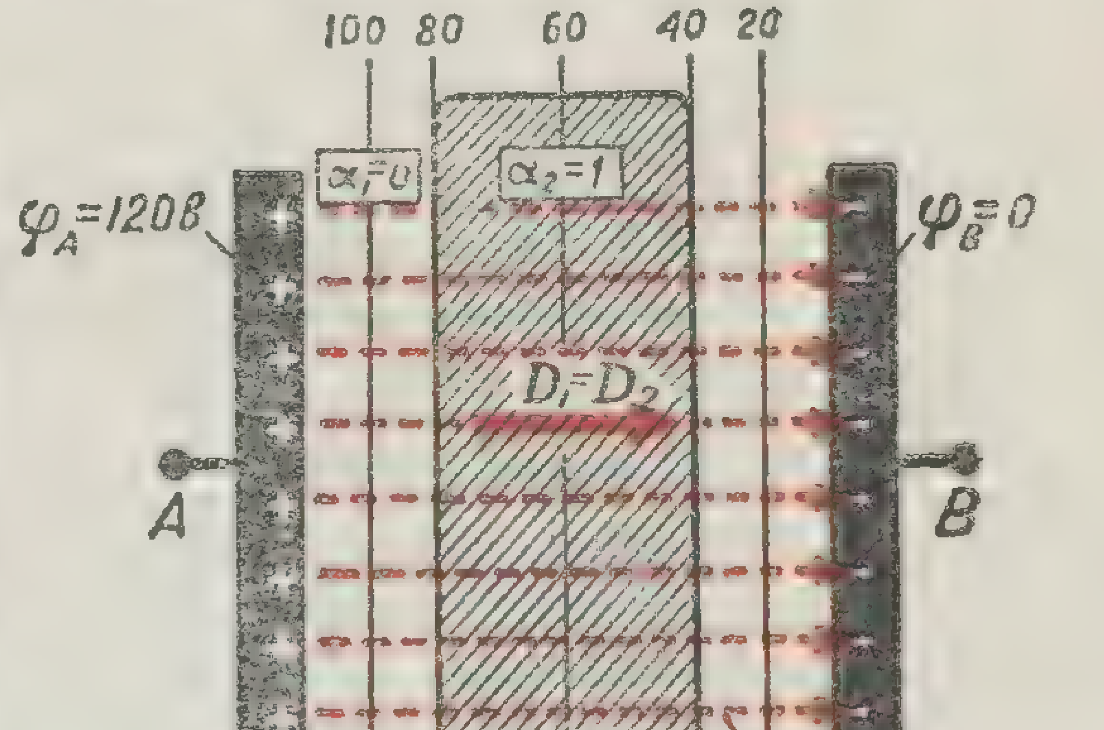
$$\sum_{0}(\varepsilon_0\bar{E}+\bar{P})\,\Delta\bar{S}=\sum Q \quad к$$

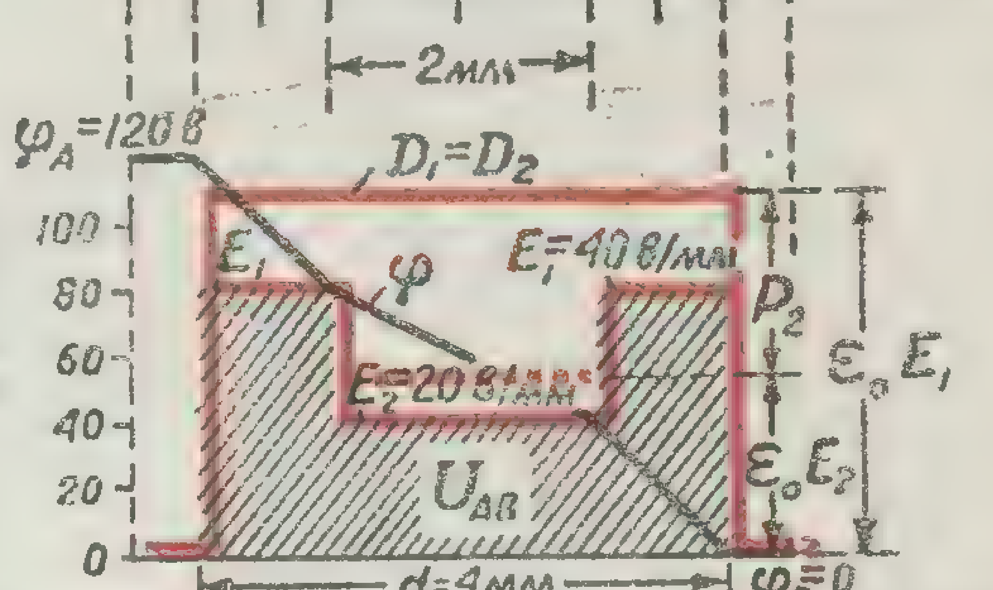
Теорема Остроградского – Гаусса при наличии диэлектриков

$$\bar{D}=\varepsilon_0\bar{E}+\bar{P} \quad \frac{к}{м^2}$$

Вектор смещения

Введение вектора смещения, поток которого сквозь замкнутую поверхность непосредственно связан со свободными зарядами, позволяет не учитывать в явной форме связанных зарядов диэлектрика, расчеты с которыми затруднительны.

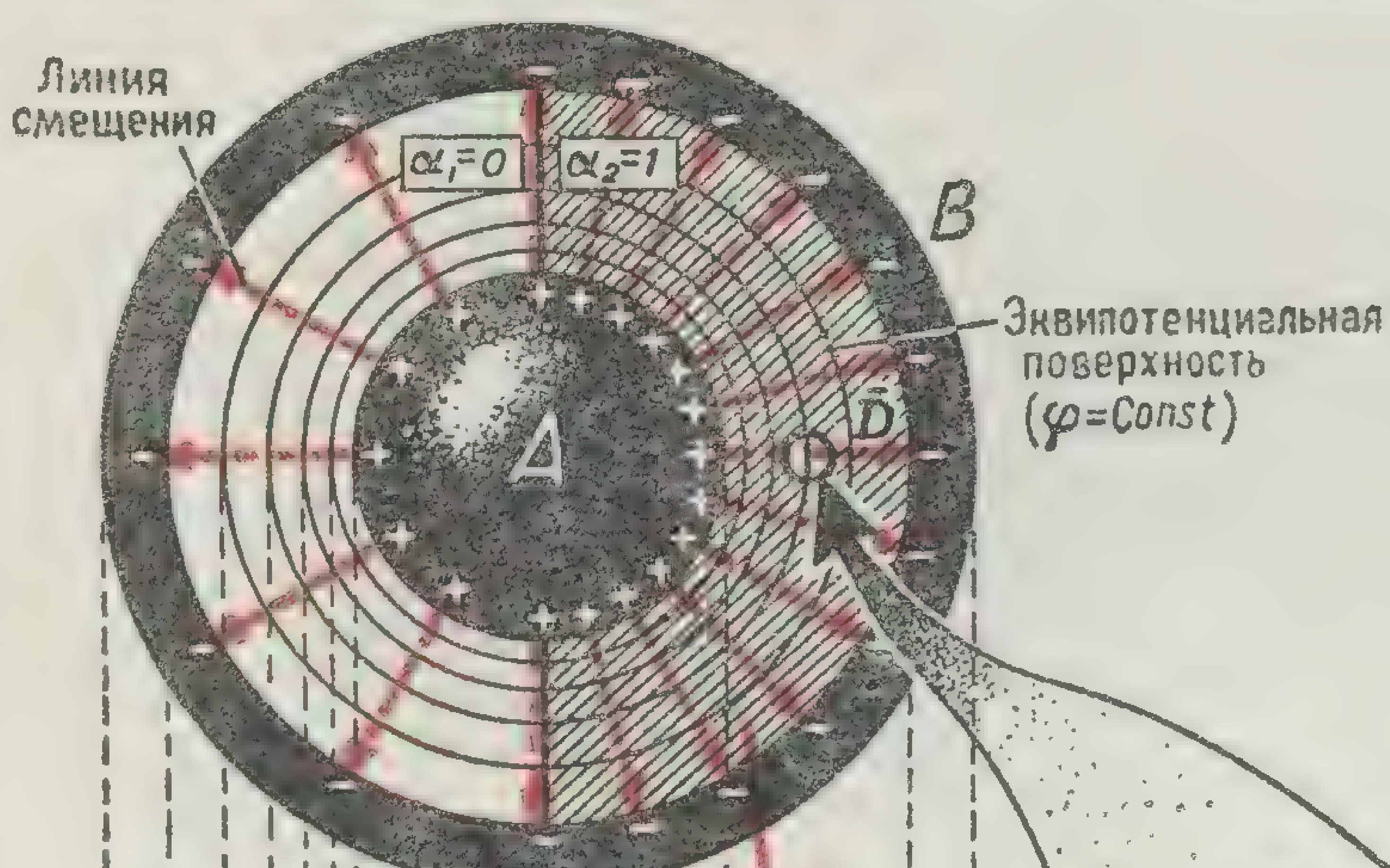


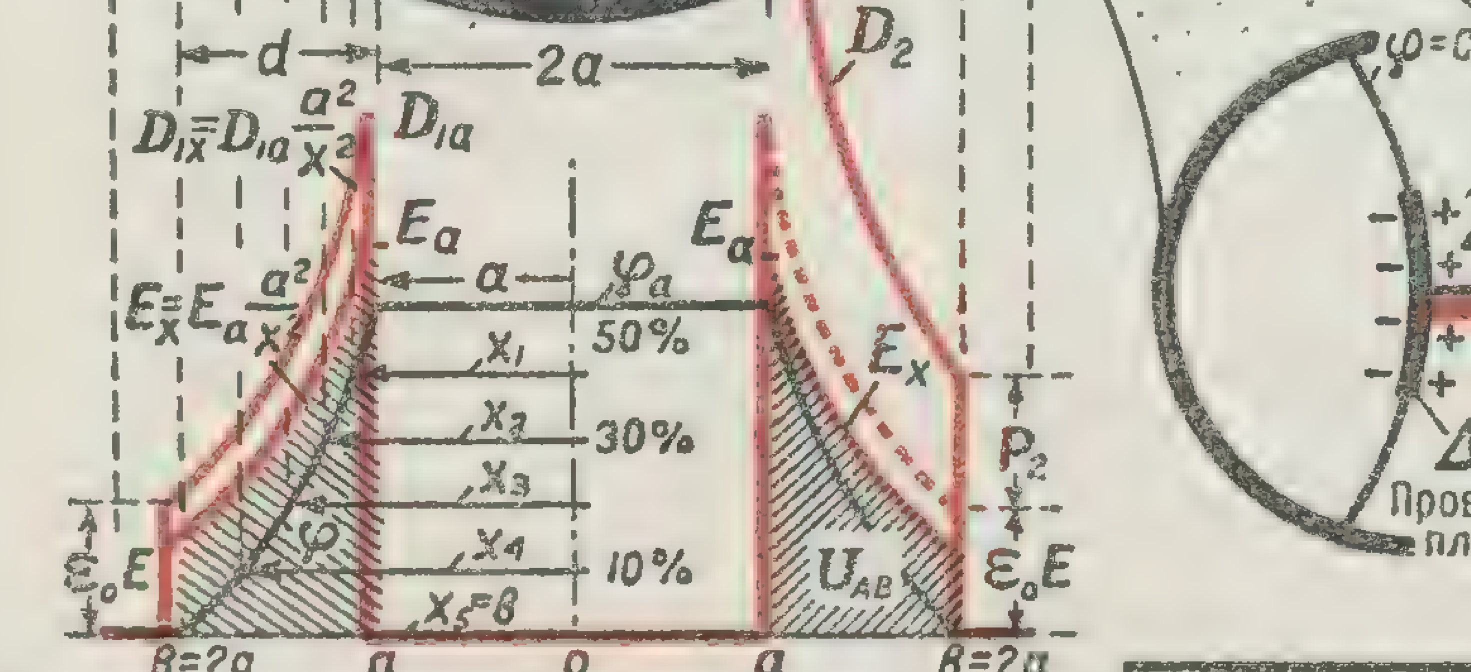


Многослойный диэлектрик в однородном поле (последовательное соединение слоев)

Ср. табл. 2

Вектор смещения является вспомогательной величиной, равной, в определенной системе единиц, сумме векторов напряженности и поляризации





Многослойный диэлектрик в сферическом поле (параллельное соединение слоев)

Ср. табл. 6, гл. 1

$\varphi=Const$

Наведенный заряд

$\Delta Q_{пр}\ \bar{n}^\circ$

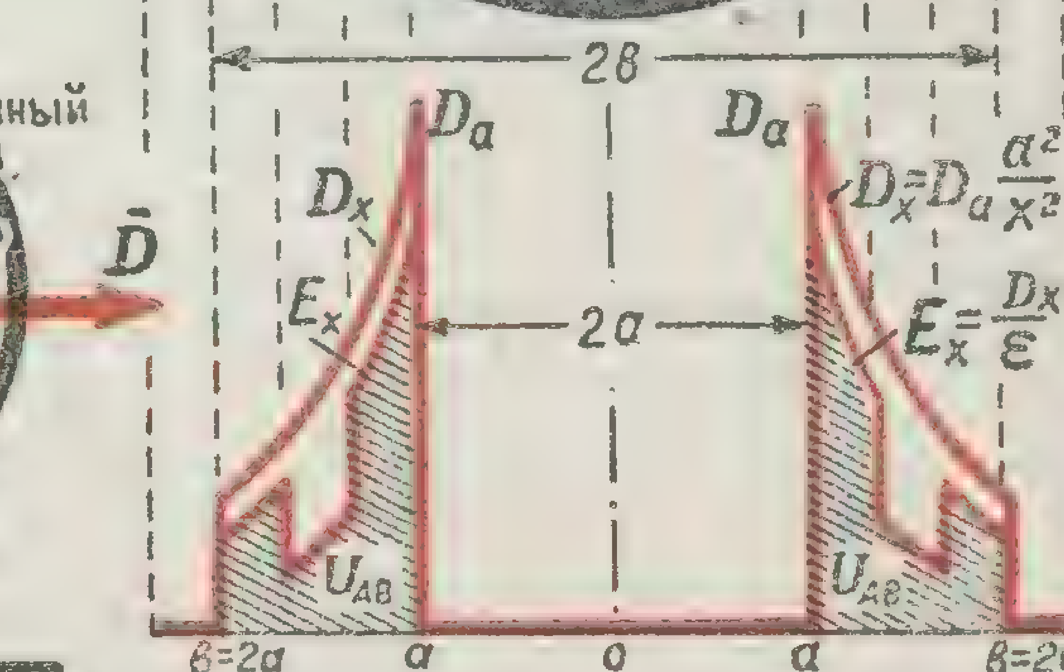
$\bar{D}$

ΔS_n

Проводящая пластинка

$$\bar{D}=\frac{\Delta Q_{пров}}{\Delta S_n}\bar{n}^\circ=\sigma_{пров}\bar{n}^\circ \quad \frac{к}{м^2}$$





Многослойный диэлектрик в сферическом поле (последовательное соединение слоев)

Вектор смещения измеряется поверхностной плотностью заряда, наведенного на бесконечно тонкой проводящей пластинке, совмещенной в рассматриваемой точке с эквипотенциальной поверхностью

$$N_D=\sum_{0}\bar{D}\cdot\Delta\bar{S}=\sum Q \quad к$$

Поток вектора смещения сквозь произвольную замкнутую поверхность равен свободному заряду, заключенному внутри этой поверхности

$$\bar{D}=\frac{\Delta N_D}{\Delta S_n}\bar{n}^\circ \quad \frac{к}{м^2}$$

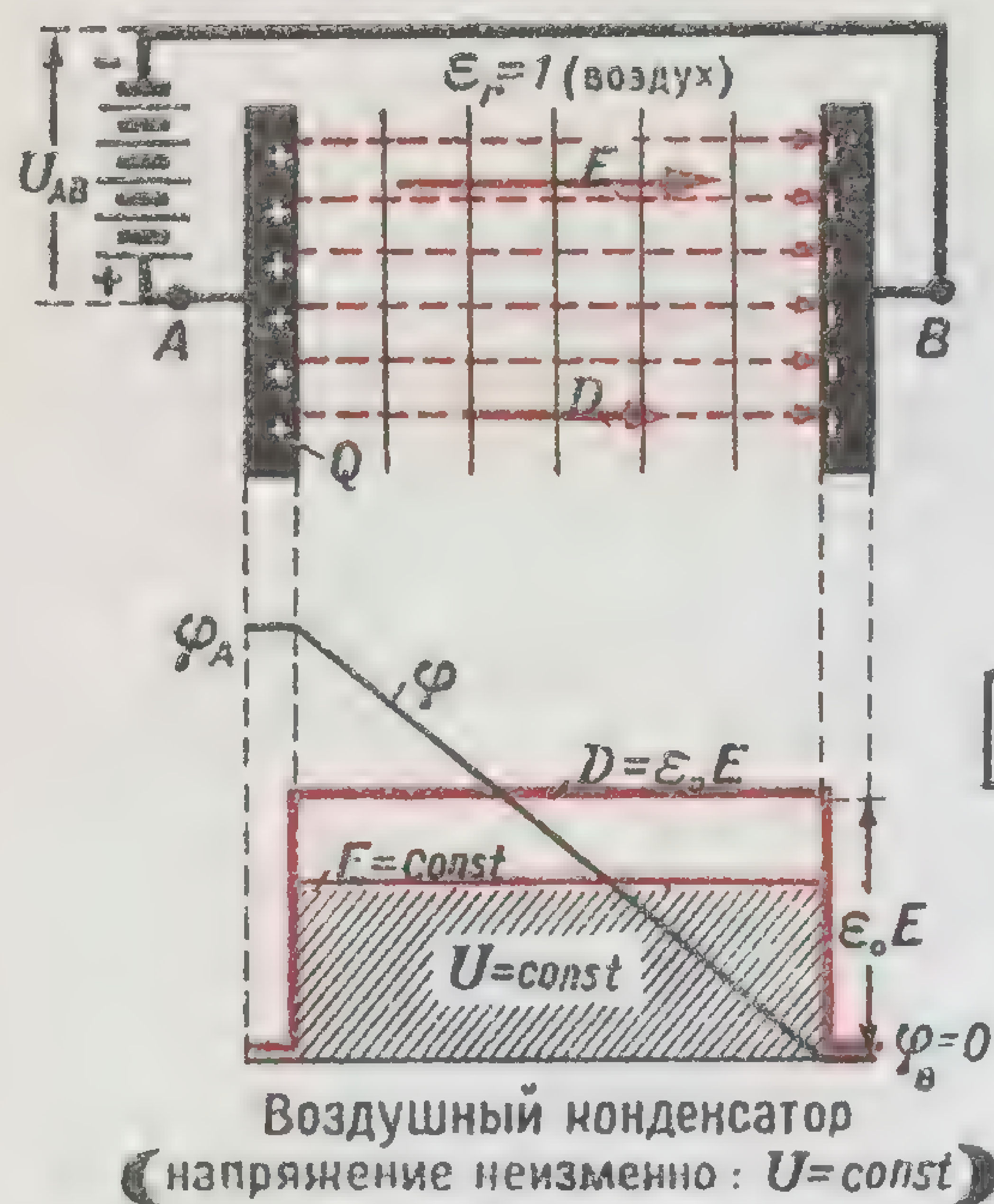
Вектор смещения равен плотности потока смещения

Теорема Остроградского–Гаусса при наличии диэлектриков

Э.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ



Воздушный конденсатор (напряжение неизменно: U=const)

$\alpha = \frac{\bar{P}}{\varepsilon_o \bar{E}} = \frac{\bar{D} - \varepsilon_o \bar{E}}{\varepsilon_o \bar{E}}$

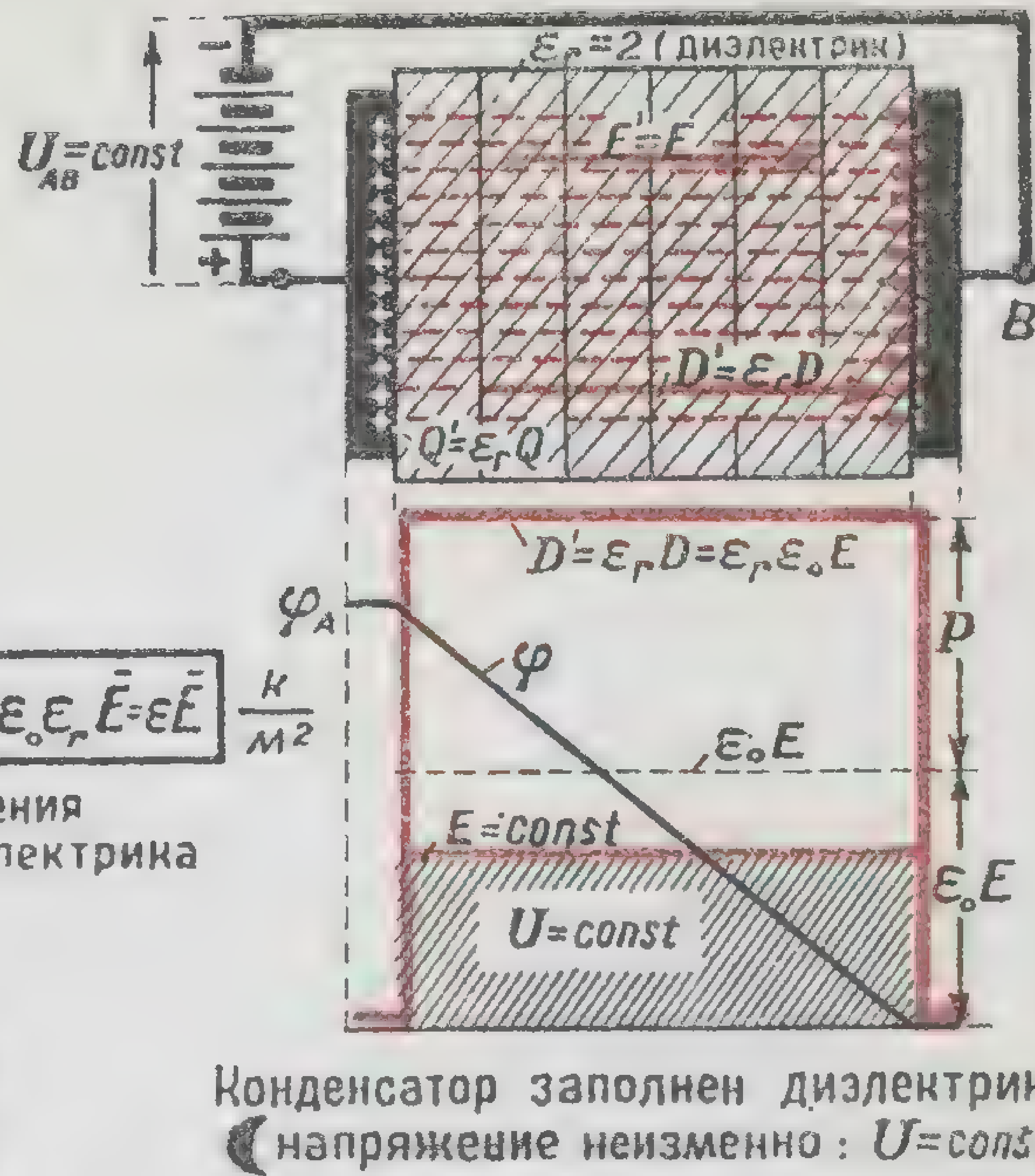
Поляризуемость диэлектрика

$\bar{D} = \varepsilon_o \bar{E} + \bar{P} = \varepsilon_o (1+\alpha) \bar{E} = \varepsilon_o \varepsilon_r \bar{E} = \varepsilon \bar{E} \ \frac{к}{м^2}$

Величина смещения после внесения диэлектрика

$\varepsilon_r = 1 + \alpha = \frac{\bar{D}}{\varepsilon_o \bar{E}}$

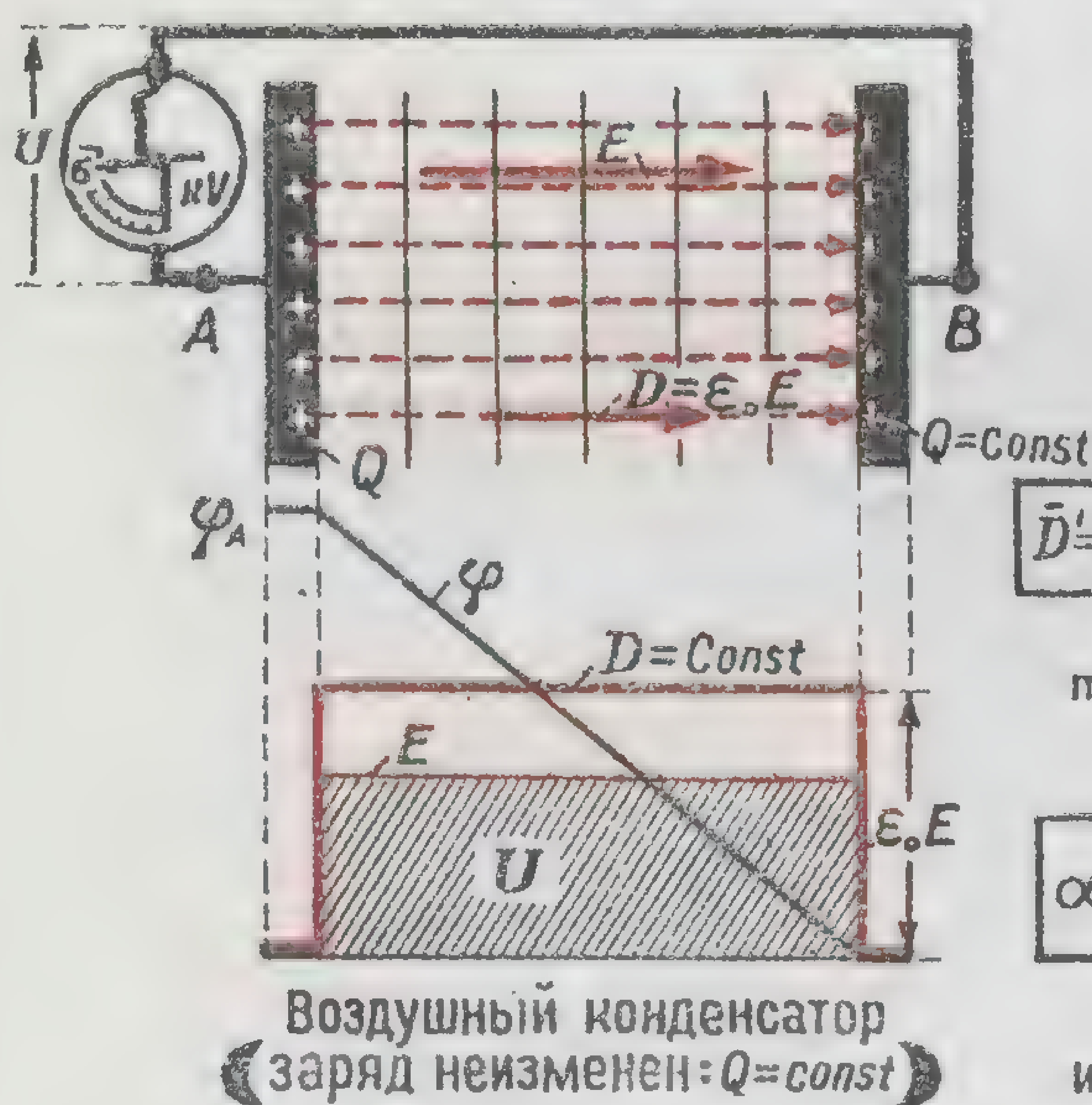
Относительная электрическая проницаемость



Конденсатор заполнен диэлектриком (напряжение неизменно: U=const)

$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_o = \frac{\bar{D}}{\bar{E}} \ \frac{ф}{м}$

Абсолютная проницаемость



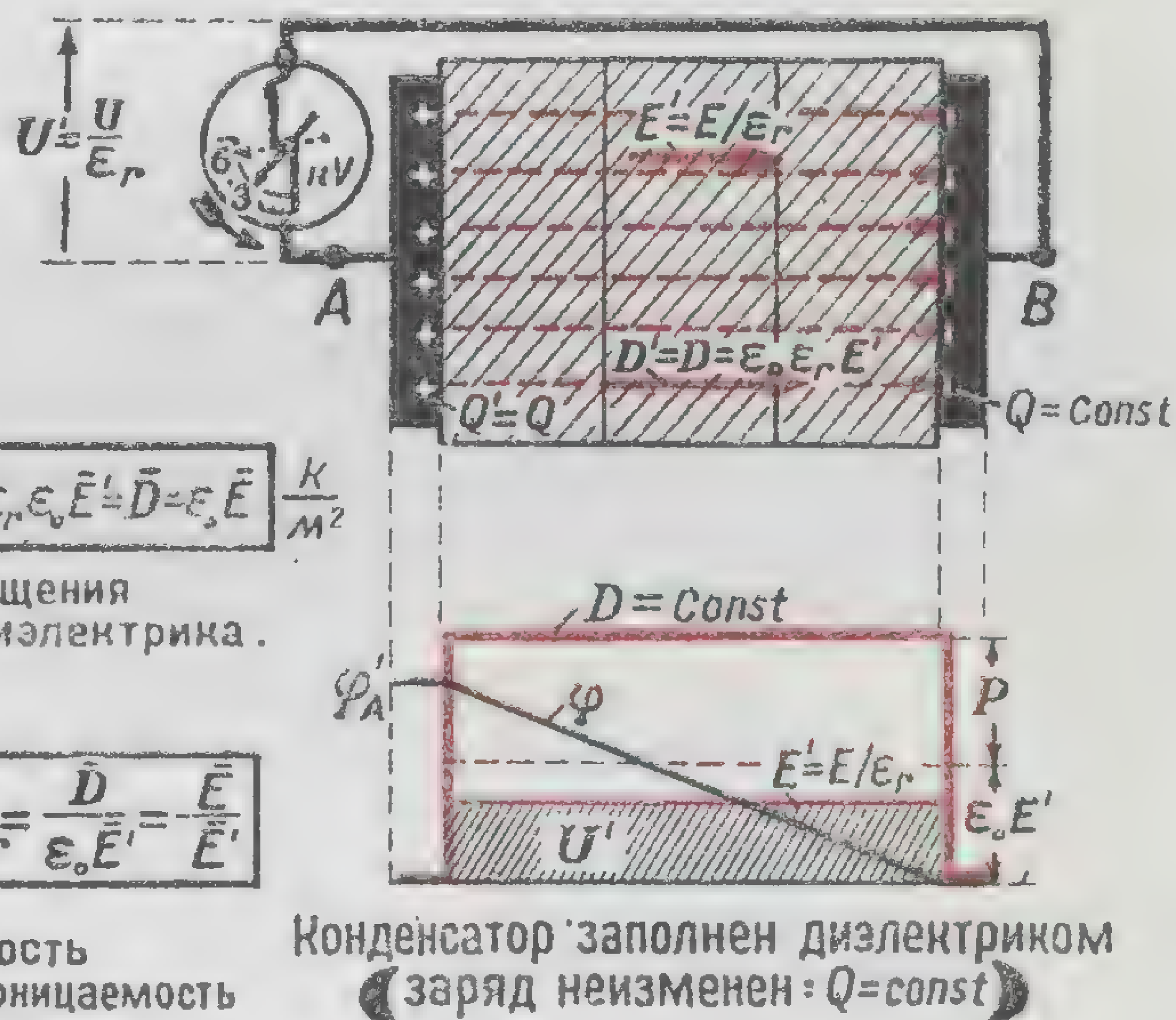
Воздушный конденсатор (заряд неизменен: Q=const)

$\bar{D}' = \varepsilon_o \bar{E}' + \bar{P} = \varepsilon_o (1+\alpha) \bar{E}' = \varepsilon_r \varepsilon_o \bar{E}' = \bar{D} = \varepsilon_o \bar{E} \ \frac{к}{м^2}$

Величина смещения после внесения диэлектрика.

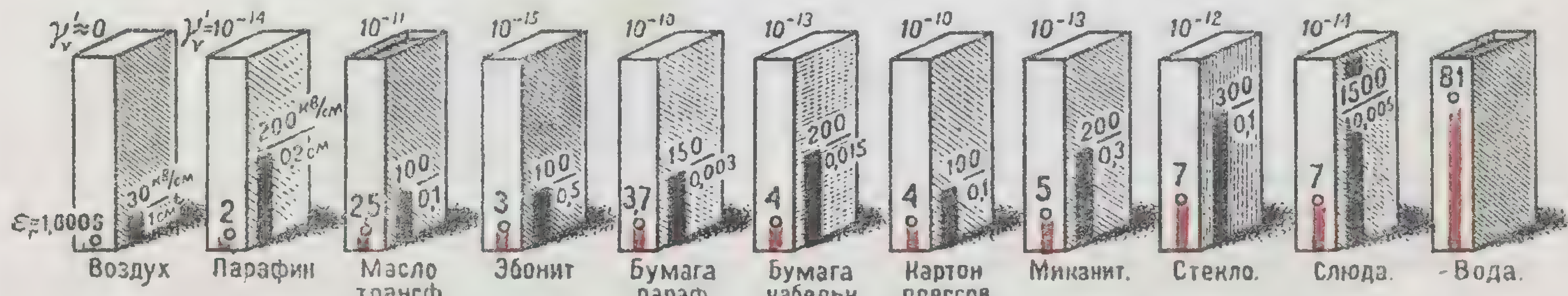
$\alpha = \frac{\bar{P}}{\varepsilon_o \bar{E}'} = \frac{\bar{E} - \bar{E}'}{\bar{E}'}$ $\quad$ $\varepsilon_r = \frac{\bar{D}}{\varepsilon_o \bar{E}'} = \frac{\bar{E}}{\bar{E}'}$

Поляризуемость и относительная проницаемость



Конденсатор заполнен диэлектриком (заряд неизменен: Q=const)

При постоянной напряженности поля **ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ** вещества (диэлектрический коэффициент) показывает **ВО СКОЛЬКО РАЗ** возрастает величина смещения, а **ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ — НА СКОЛЬКО**, в относительных единицах, возрастает величина смещения при замене вакуума данным веществом



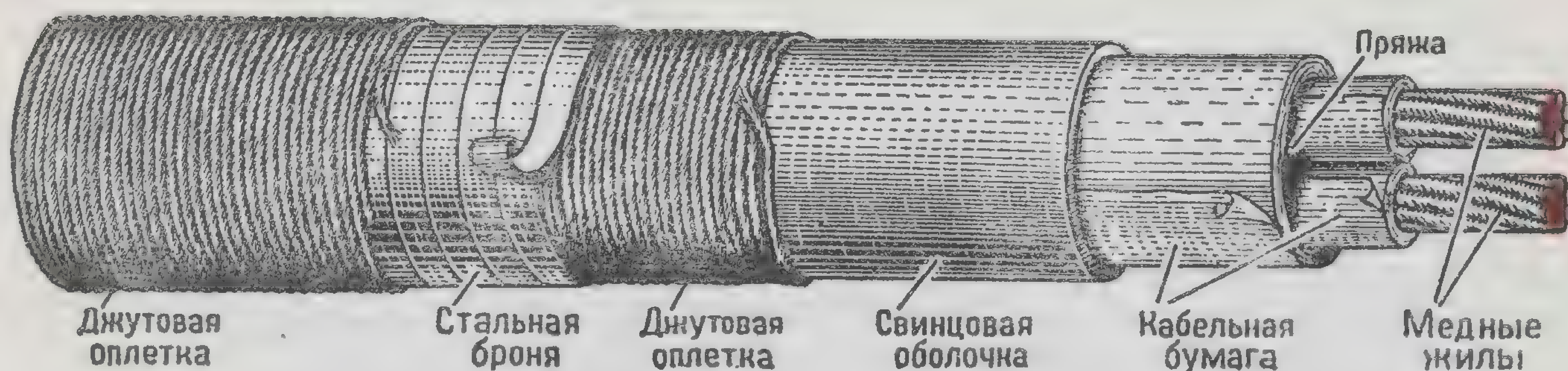
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ε_r, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ $E_{проб}\left(\frac{кв}{см}\right)$ ПРИ ТОЛЩИНЕ d (см) И УДЕЛЬНАЯ ОБЪЕМНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ $\gamma_v'\left(\frac{1}{ом \cdot м}\right)$ НЕКОТОРЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

(см. также таблицу 14 „Пробой диэлектрика")

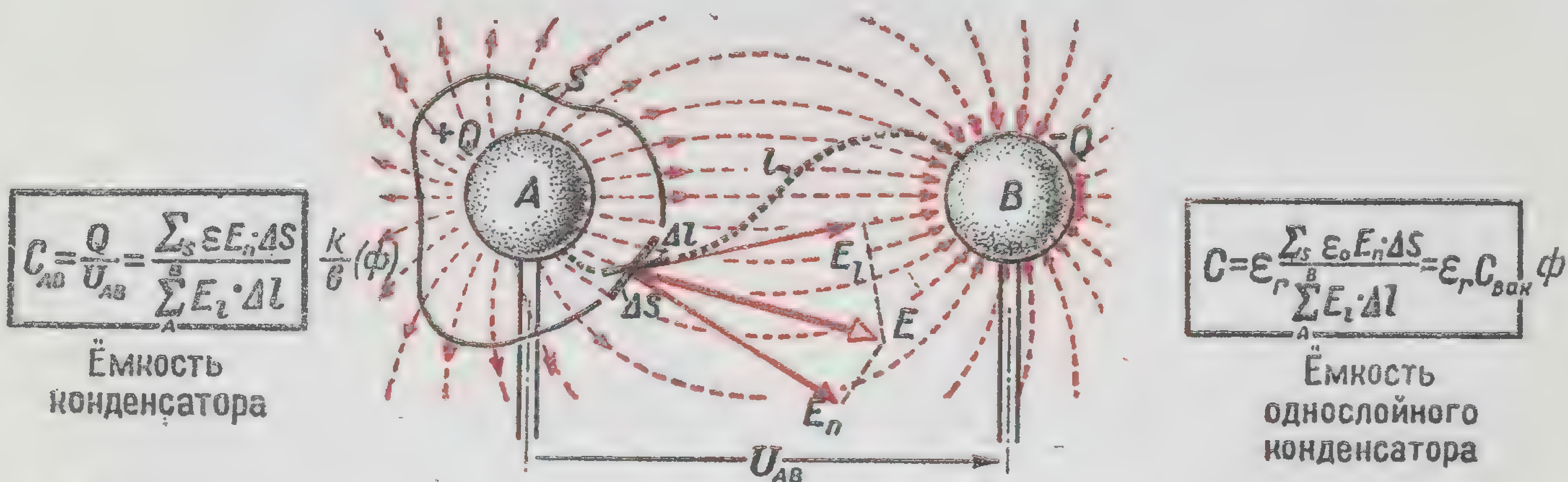
З.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ЕМКОСТЬ



ДВУХЖИЛЬНЫЙ КАБЕЛЬ КАК КОНДЕНСАТОР.



Ёмкость конденсатора

Ёмкость однослойного конденсатора

Емкость конденсатора, измеряемая отношением его заряда к напряжению между обкладками, является характеристикой конденсатора, зависящей от его геометрических размеров, т. е. от конфигурации поля, и от свойств изолирующей среды

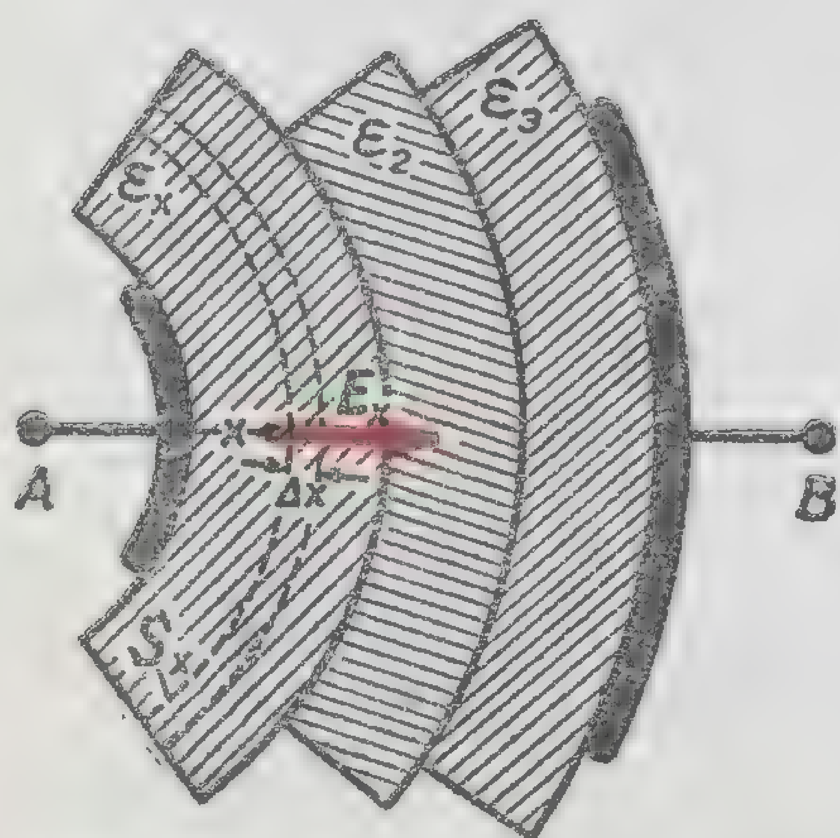
$$\varepsilon_r=\frac{C}{C_{вак}}$$

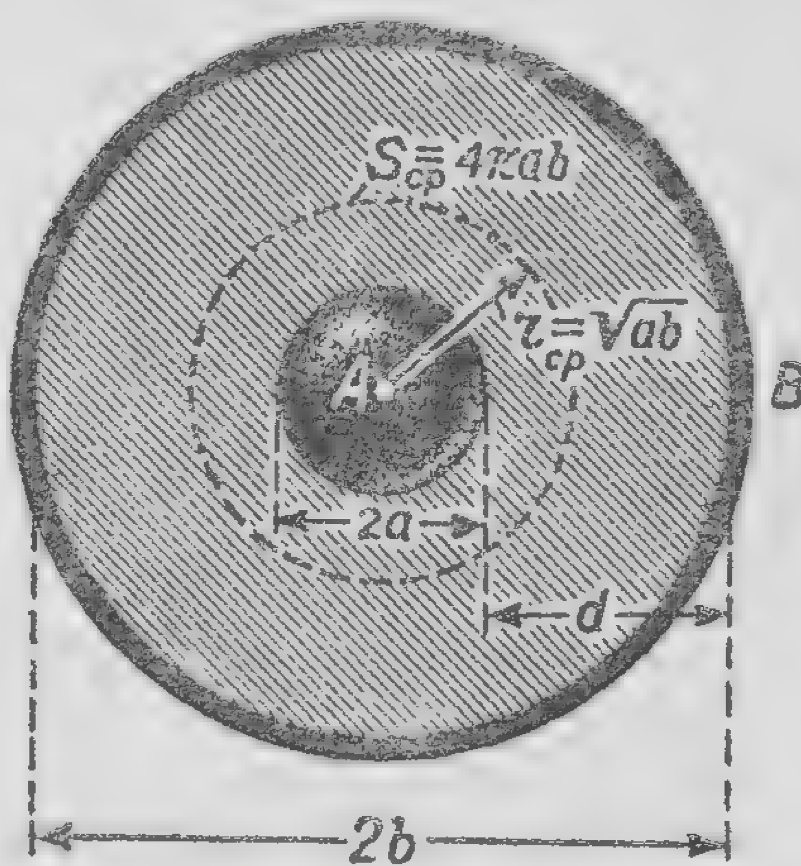
Относительная проницаемость

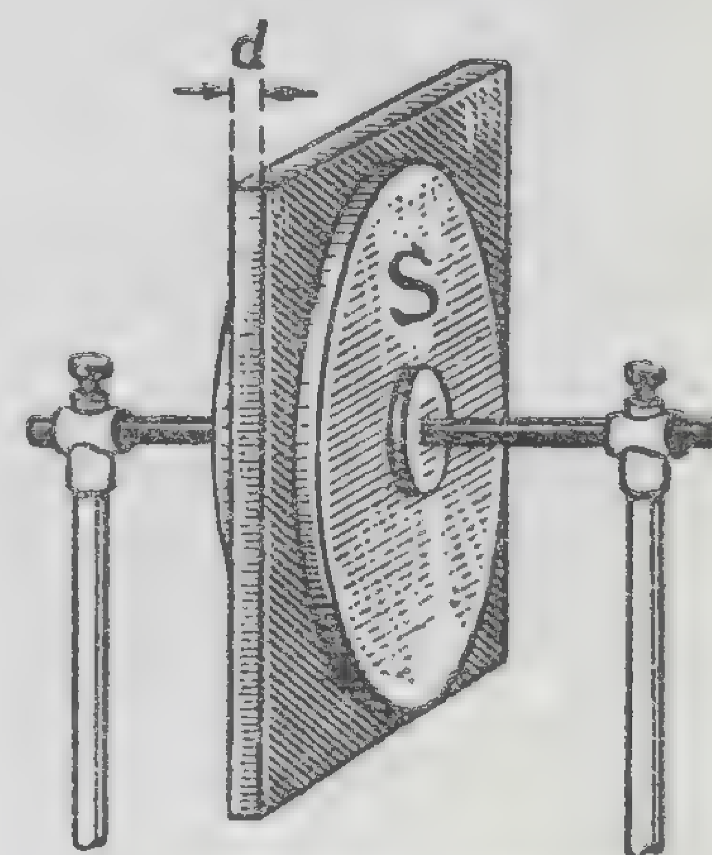
ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ диэлектрика показывает **ВО СКОЛЬКО РАЗ** возрастает ёмкость конденсатора, а **ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ—НА СКОЛЬКО**, в относительных единицах, возрастает ёмкость конденсатора при замене в нем вакуума рассматриваемым диэлектриком

$$\alpha=\frac{C-C_{вак}}{C_{вак}}$$

Поляризуемость







$$\frac{1}{C}=\frac{U_{AB}}{Q}=\sum_A^B\frac{E_x \cdot \Delta X}{\varepsilon_x \cdot E_x \cdot S_x}=\sum_A^B\frac{\Delta X}{\varepsilon_x \cdot S_x} \quad \frac{1}{ф}$$

Вычисление ёмкости симметричного конденсатора

$$C=\varepsilon\frac{S_{ср}}{d}=\varepsilon\frac{4\pi ab}{b-a} \quad ф$$

Ёмкость сферического конденсатора

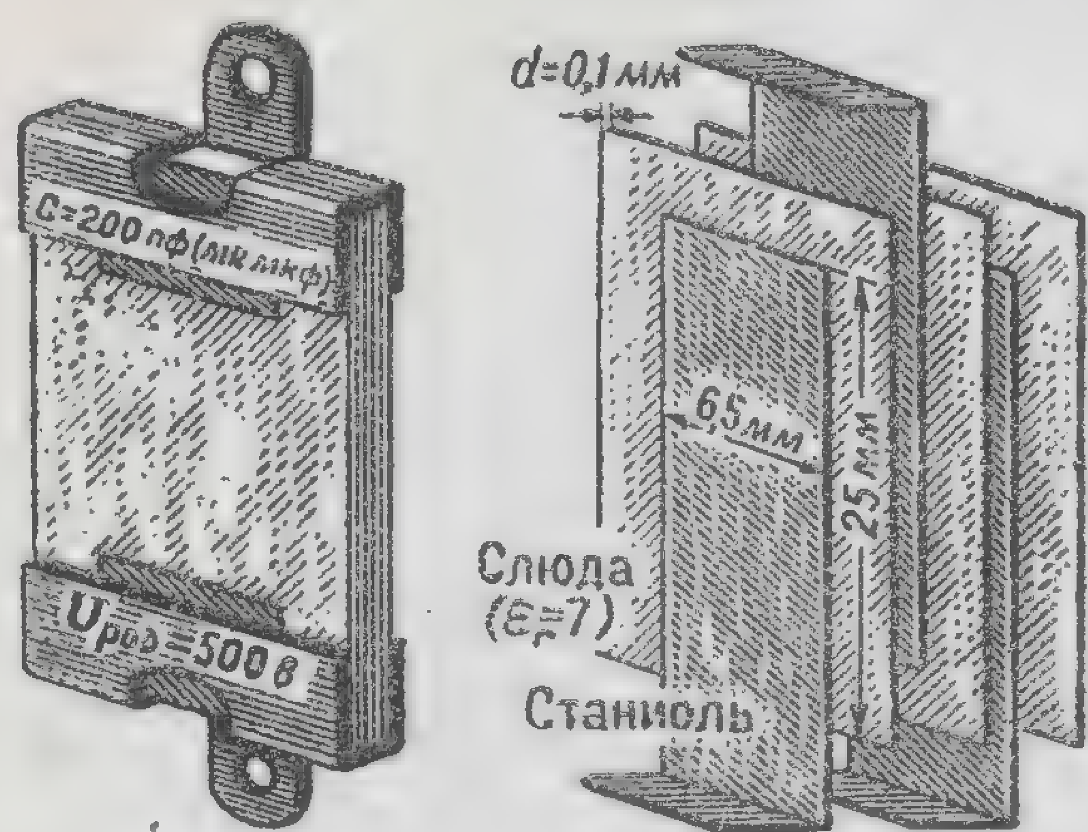
$$C=\varepsilon\frac{S}{d} \quad ф$$

Ёмкость плоского конденсатора

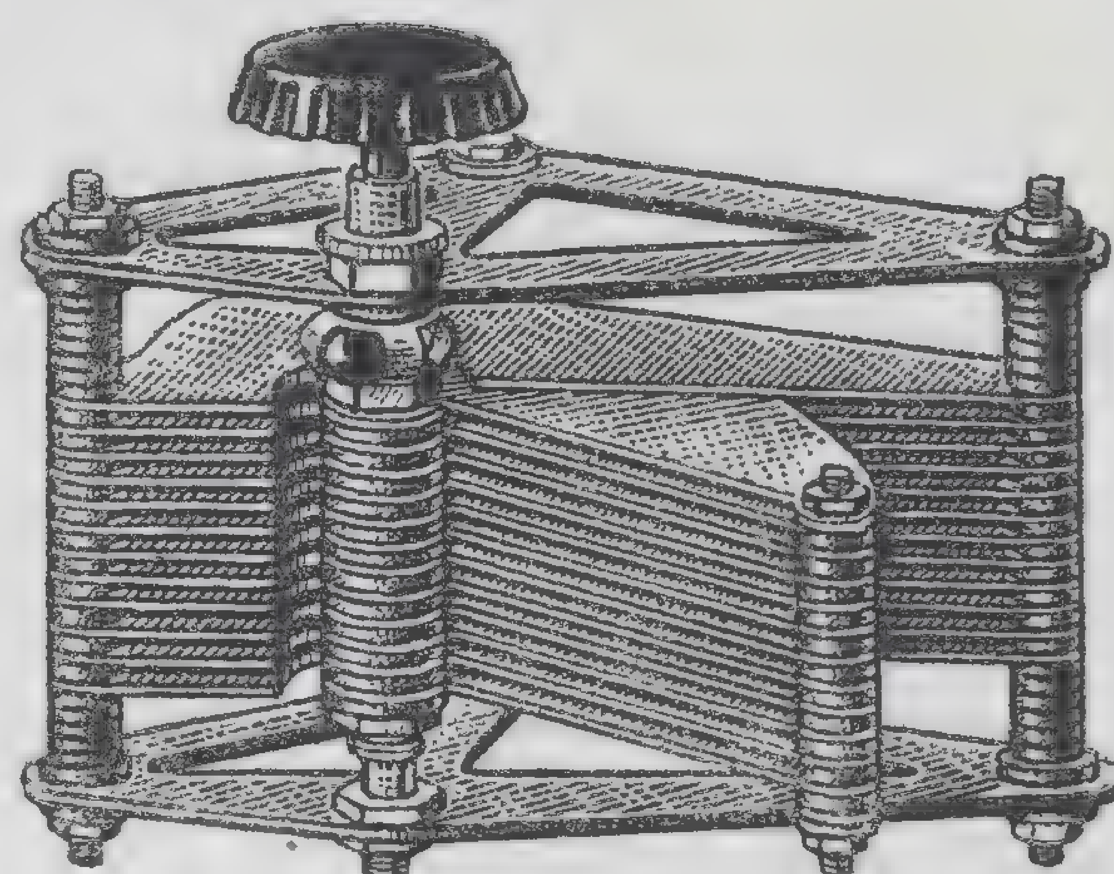
Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

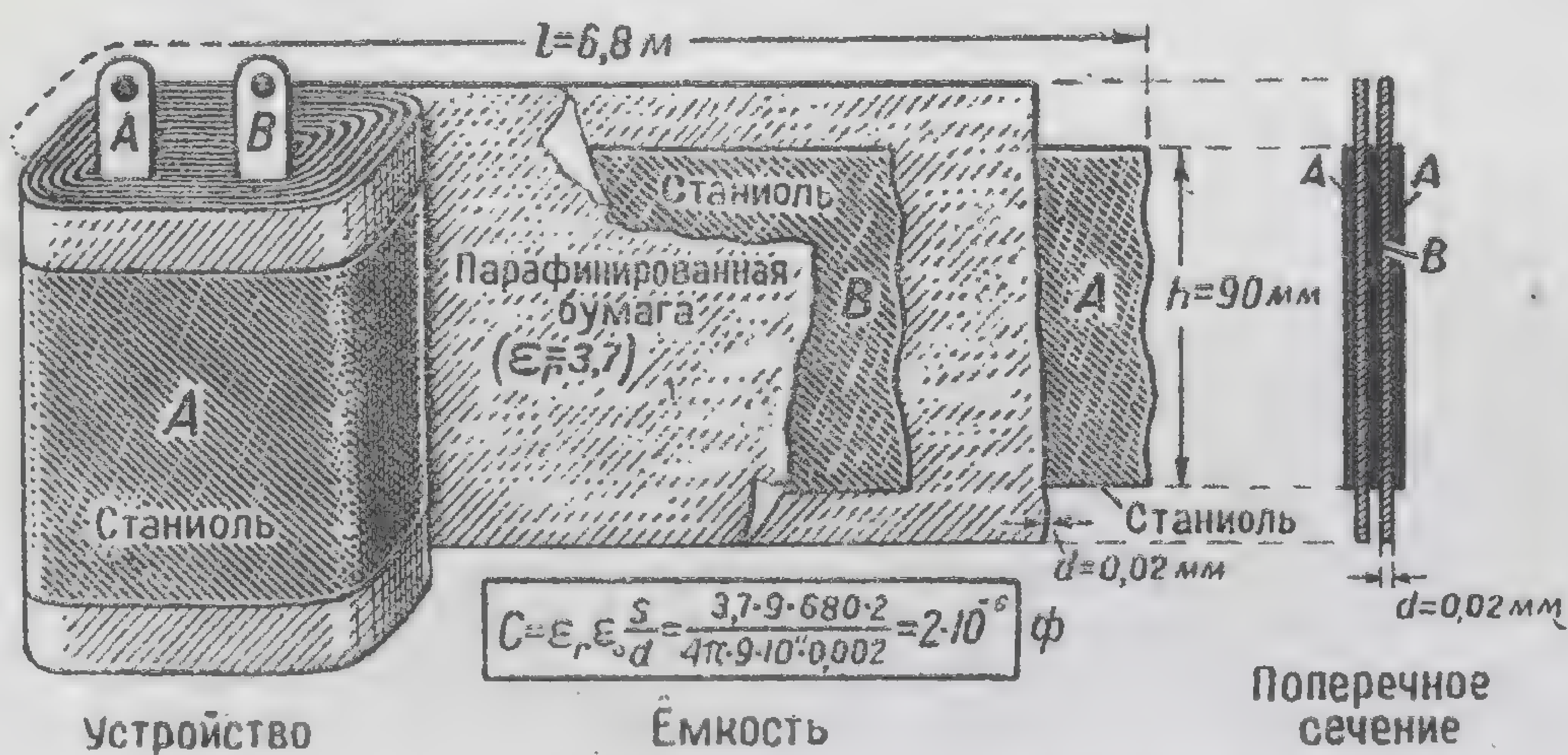
КОНДЕНСАТОРЫ

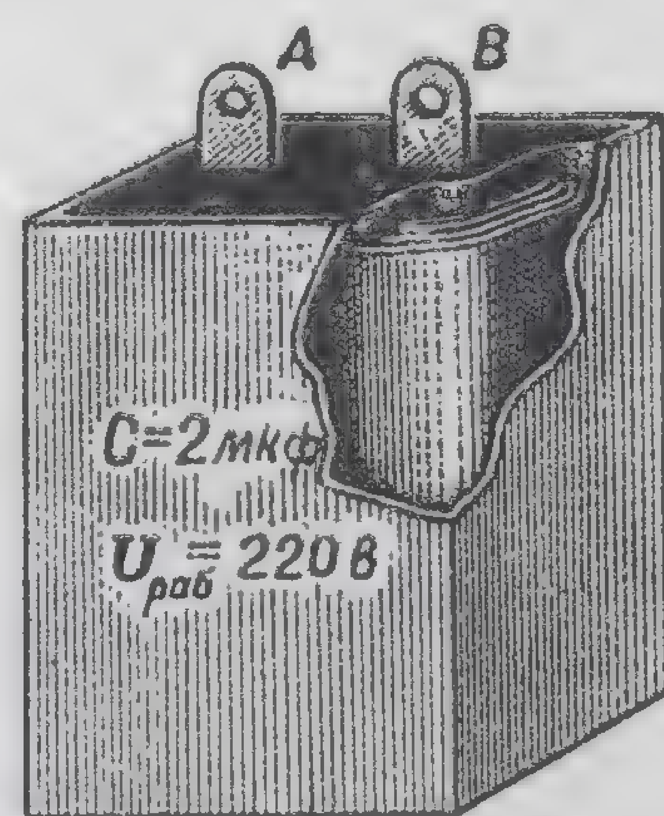


Слюдяной конденсатор

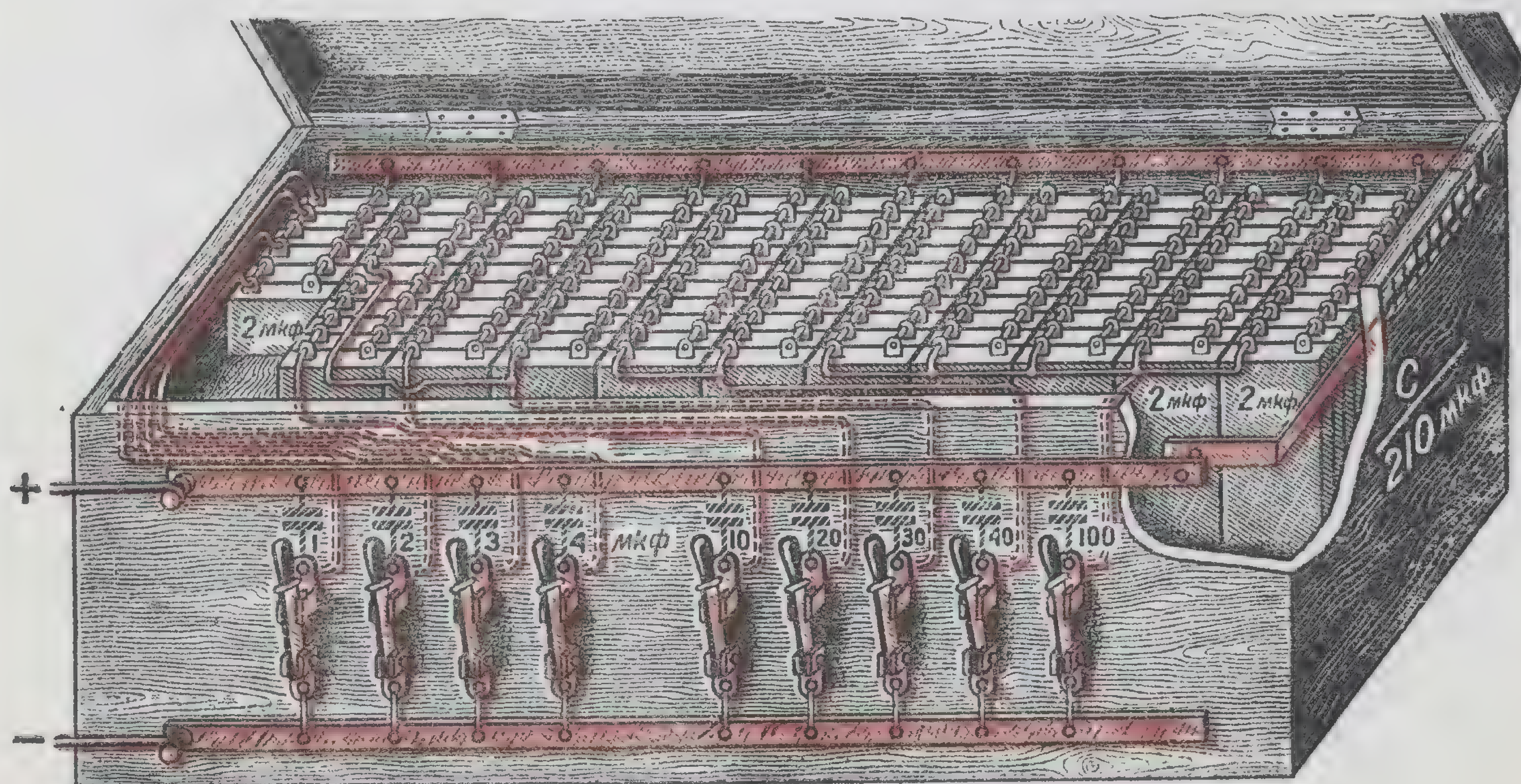


Воздушный конденсатор переменной ёмкости





КОНДЕНСАТОР С БУМАЖНОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

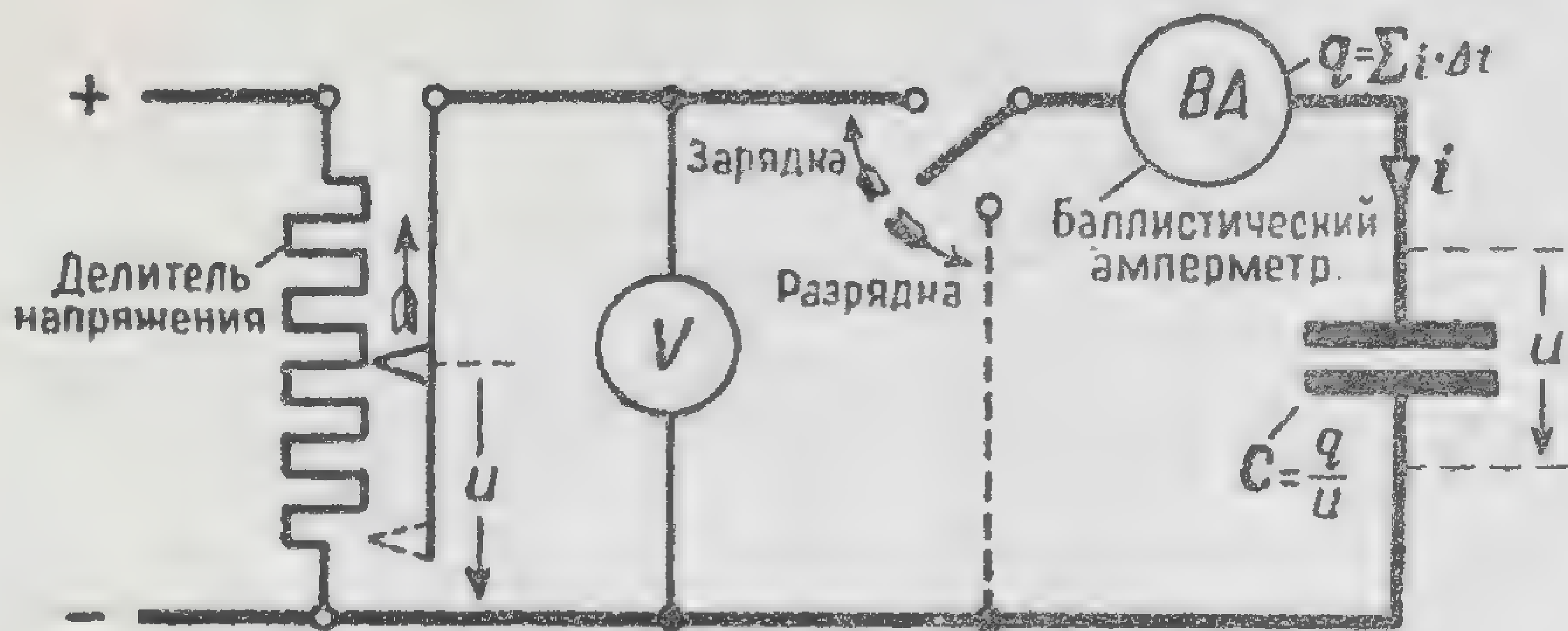


КОНДЕНСАТОРНЫЙ ЯЩИК

Э.И.Расовский

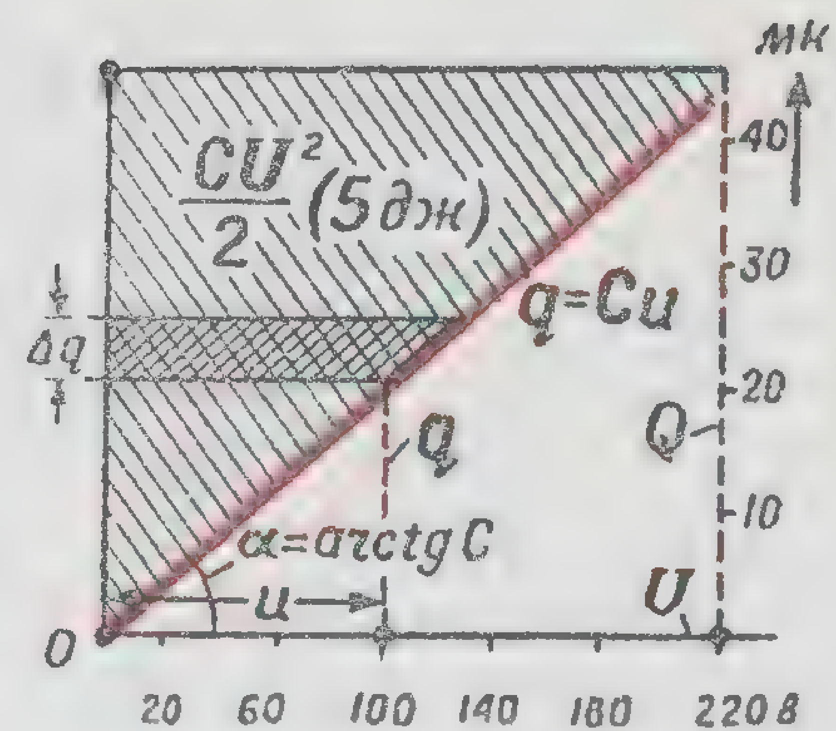
Худ. А.Меньшиков

ЗАРЯДКА И РАЗРЯДКА КОНДЕНСАТОРА



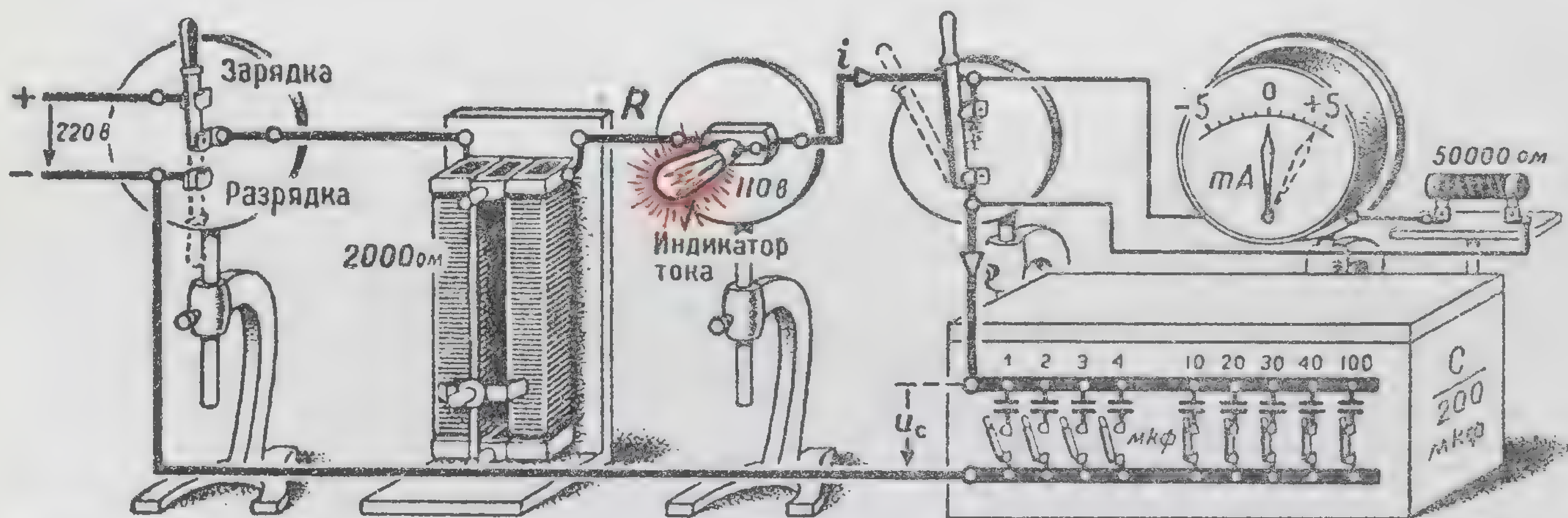
$$W_c=\sum_0^Q u\cdot\Delta q=\frac{QU}{2}=\frac{CU^2}{2}=\frac{Q^2}{2C}\ дж$$

Энергия заряженного конденсатора

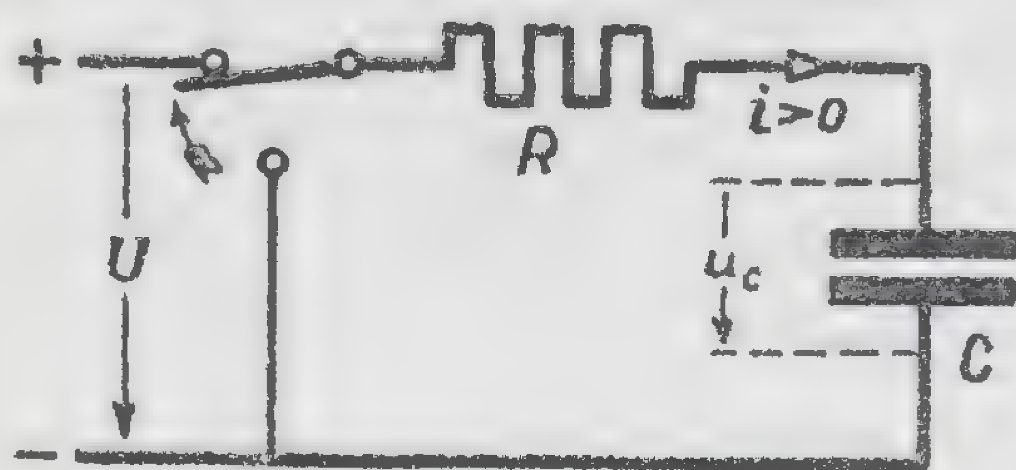


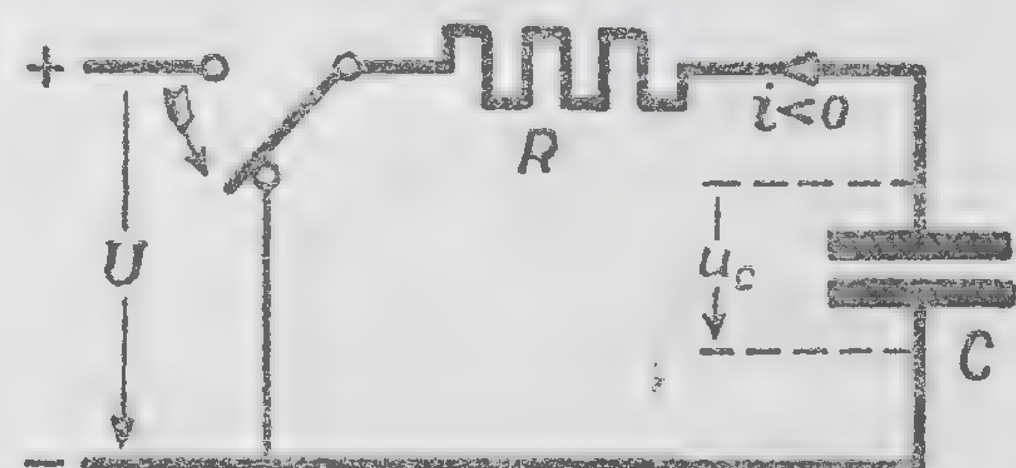
Характеристика конденсатора

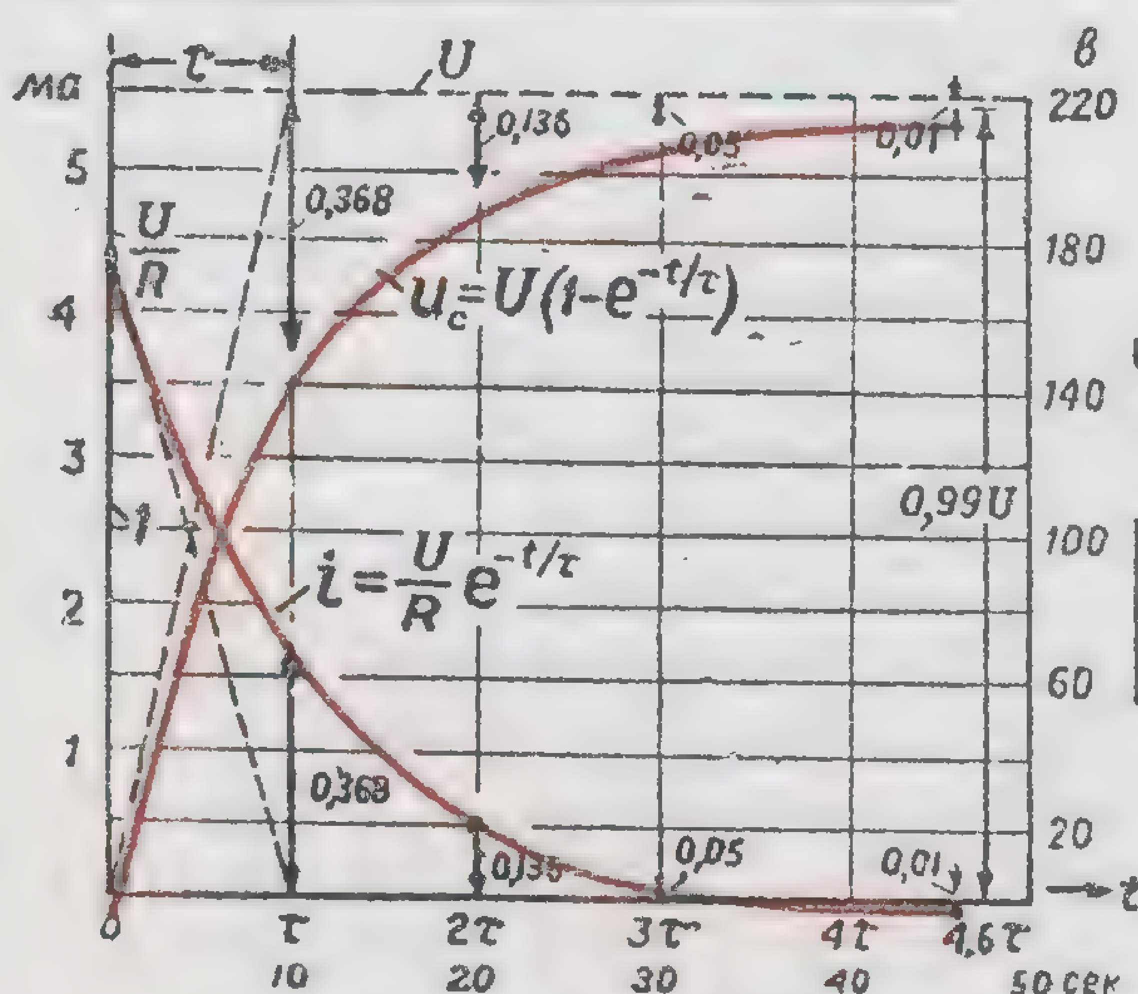
НАПРЯЖЕНИЕ, ЗАРЯД И ЭНЕРГИЯ КОНДЕНСАТОРА.



ЗАРЯДКА И РАЗРЯДКА КОНДЕНСАТОРА, ВКЛЮЧЕННОГО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО С СОПРОТИВЛЕНИЕМ







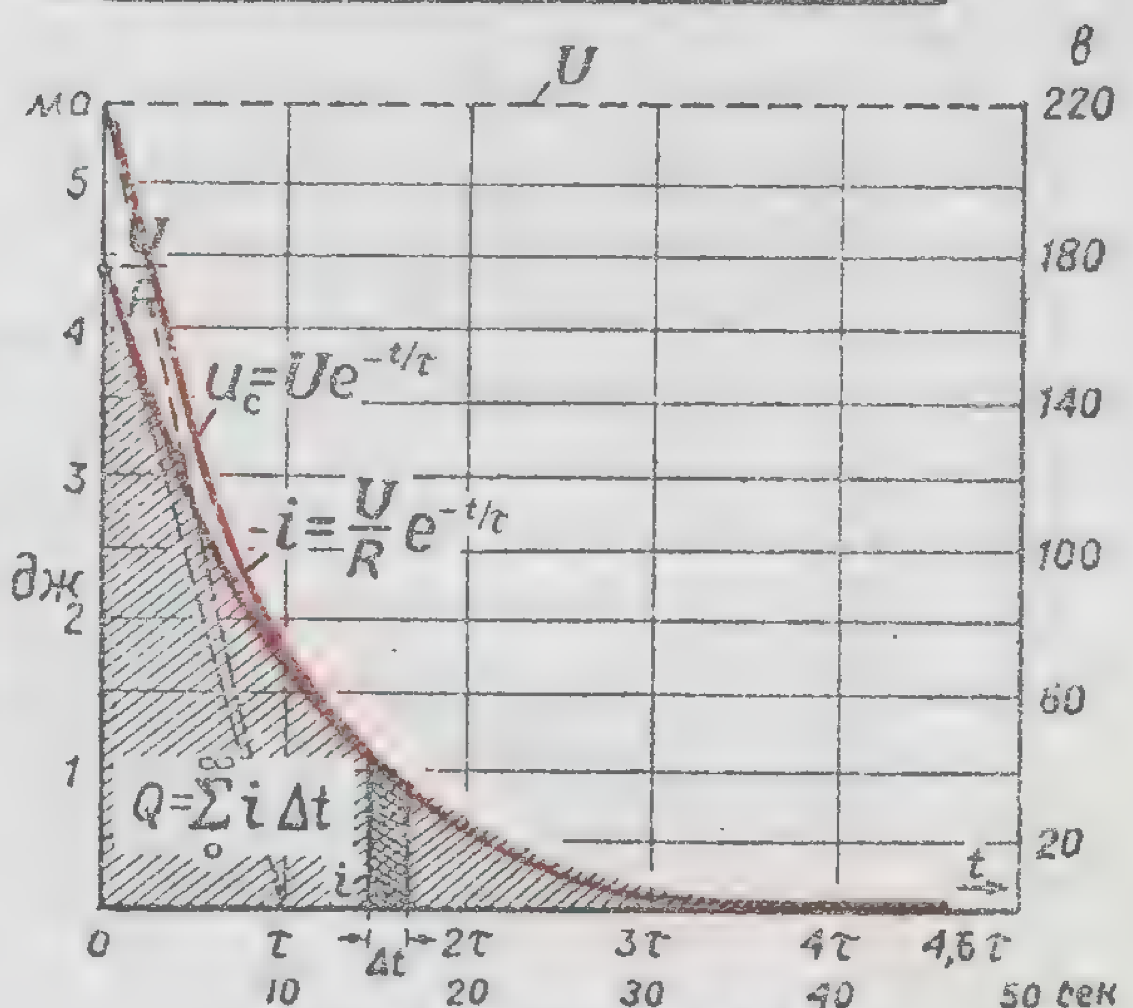
ЗАРЯДКА

$$\tau=RC\ сек$$

Постоянная времени цепи с сопротивлением и ёмкостью

$$W_R=\sum_0^\infty i^2R\cdot\Delta t=\frac{CU^2}{2}\ дж$$

Тепловые потери в цепи при зарядке или разрядке

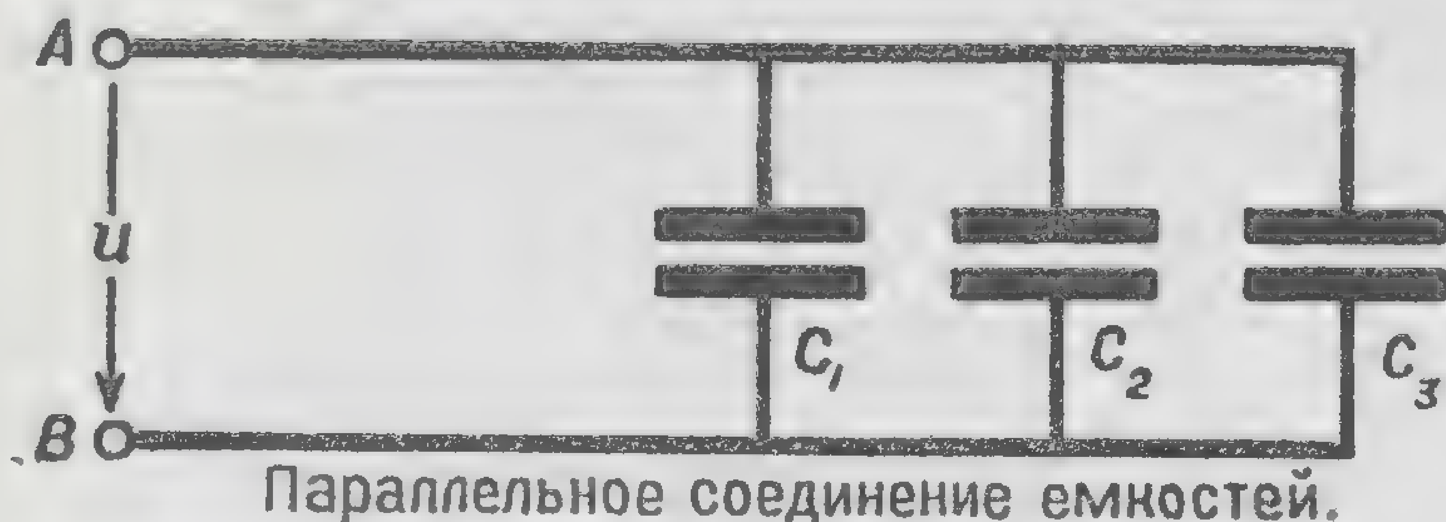


РАЗРЯДКА

Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

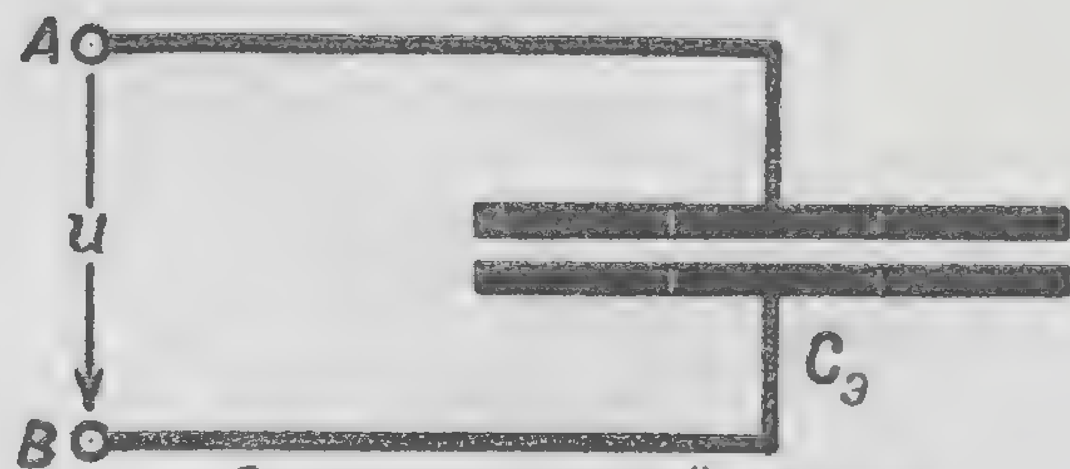
ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ



Параллельное соединение емкостей.

$C_э = C_1 + C_2 + \dots = \sum C$ ф

Эквивалентная (общая) ёмкость.

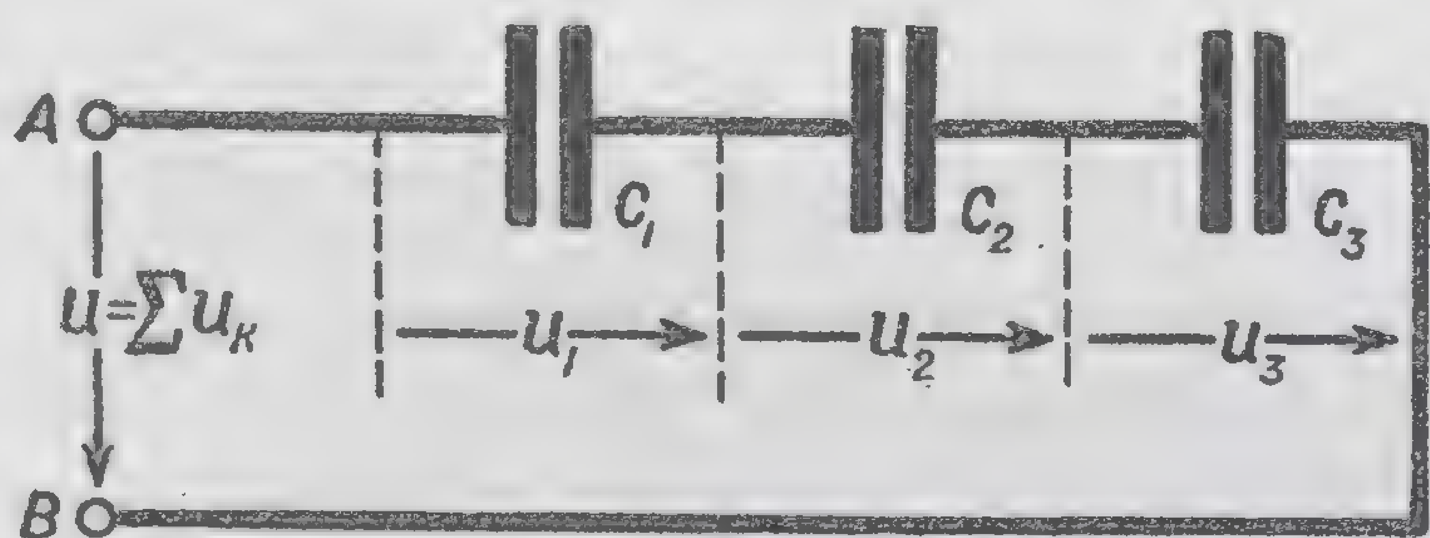


Эквивалентная ёмкость.

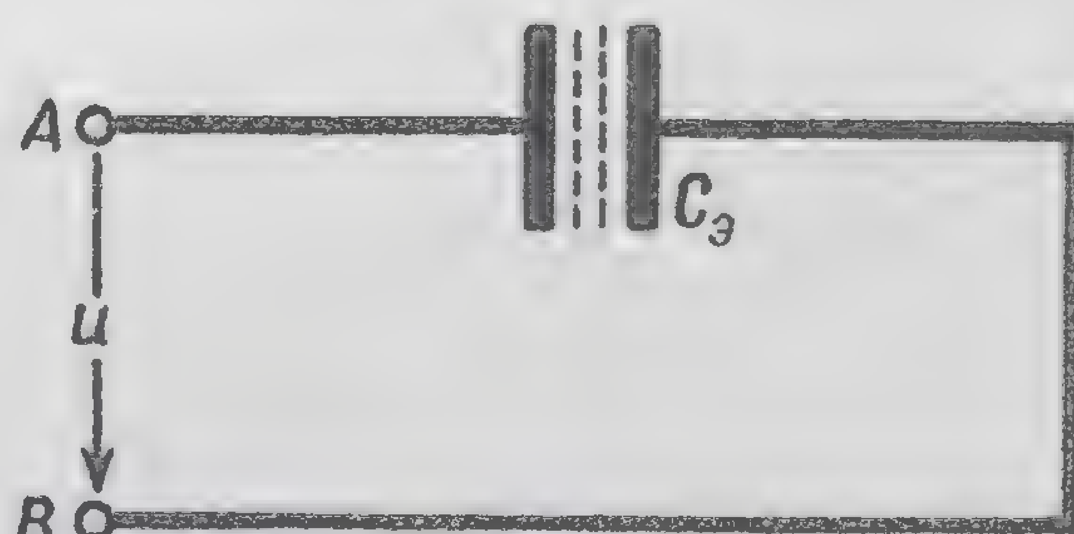
$C_э = nC$ ф

Частный случай n одинаковых емкостей.

При параллельном соединении конденсаторов их ёмкости складываются



Последовательное соединение емкостей.



Эквивалентная ёмкость.

$\frac{1}{C_э} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots = \sum \frac{1}{C}$ $\frac{1}{ф}$

Величина, обратная эквивалентной емкости

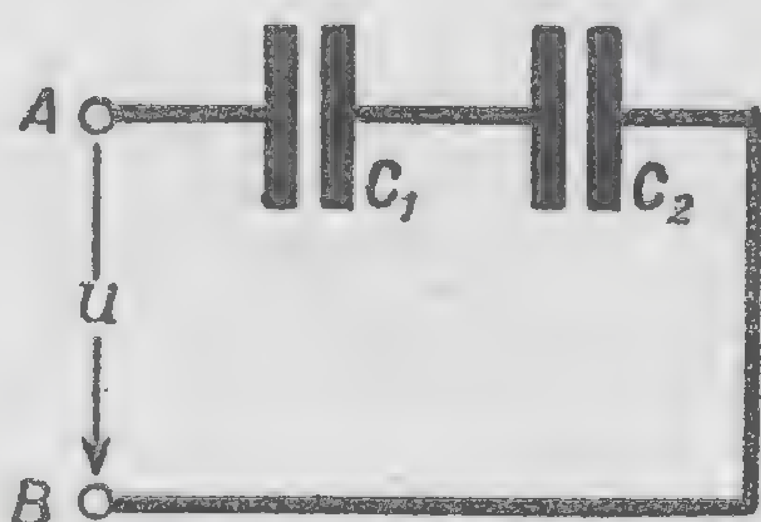
$U_1 : U_2 : U_3 = \frac{1}{C_1} : \frac{1}{C_2} : \frac{1}{C_3}$

Отношение частичных напряжений.

$C_э = \frac{C_1}{n}$ ф $\quad U_1 = \frac{U}{n}$ в

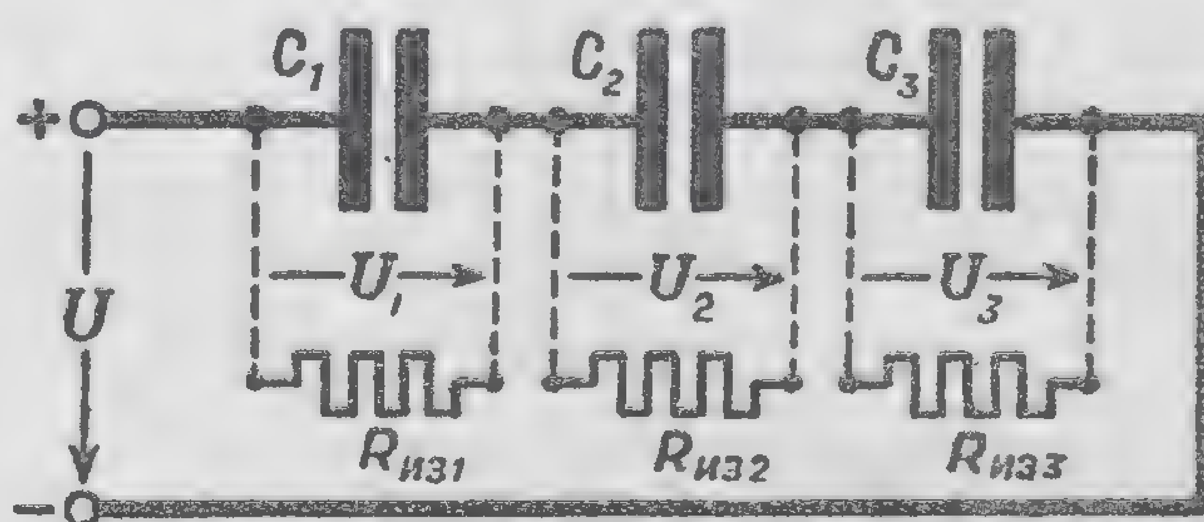
Частный случай n одинаковых емкостей.

При последовательном соединении конденсаторов складываются величины, обратные их емкостям (диэлектрические сопротивления). Напряжения отдельных конденсаторов относятся между собою обратно пропорционально их емкостям.



$C_э = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$ ф

Частный случай двух последовательно соединенных конденсаторов.



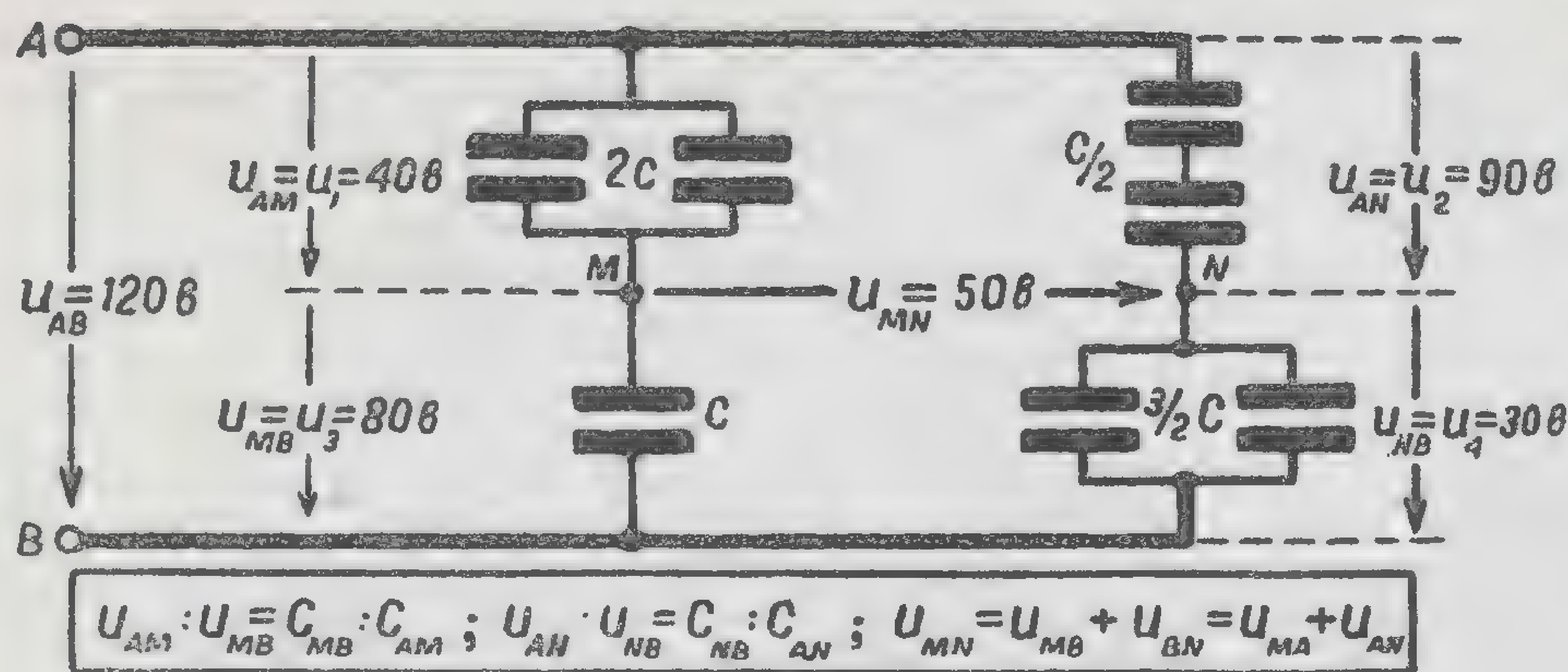
$U_1 : U_2 : U_3 = R_{из1} : R_{из2} : R_{из3}$

Влияние изоляции конденсаторов на распределение между ними постоянного напряжения.

Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ



$U_{AM}:U_{MB}=C_{MB}:C_{AM}$; $U_{AN}:U_{NB}=C_{NB}:C_{AN}$; $U_{MN}=U_{MB}+U_{BN}=U_{MA}+U_{AN}$

Параллельное соединение двух ветвей

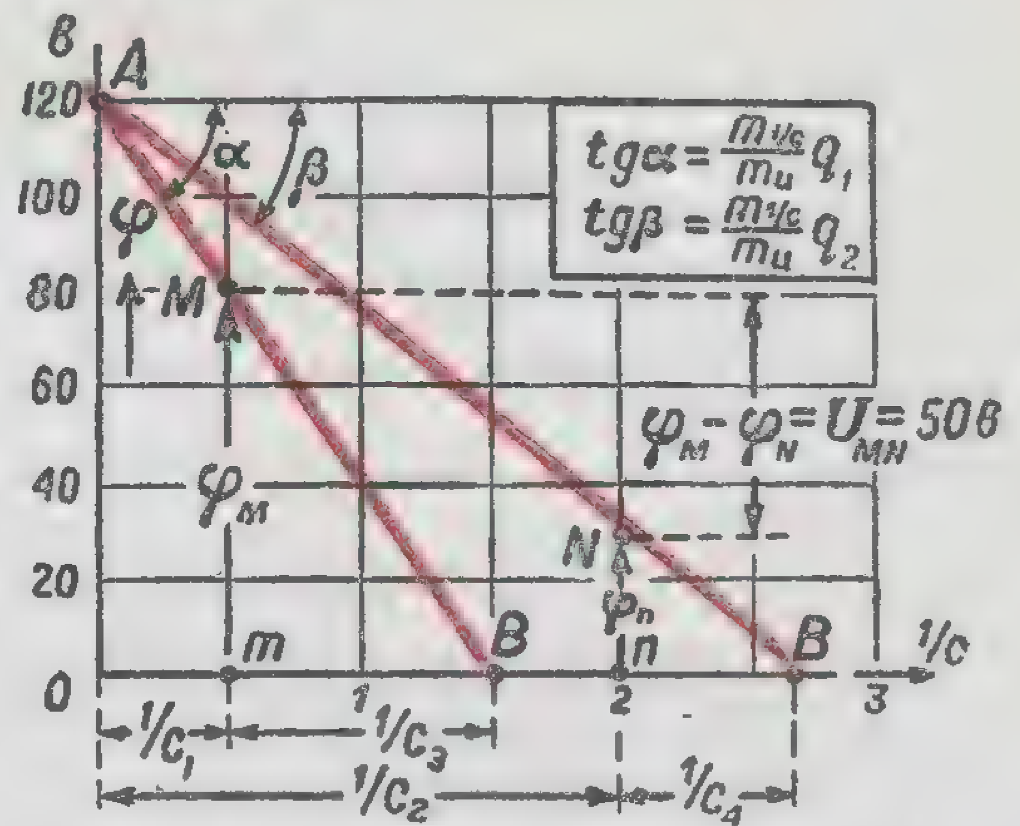
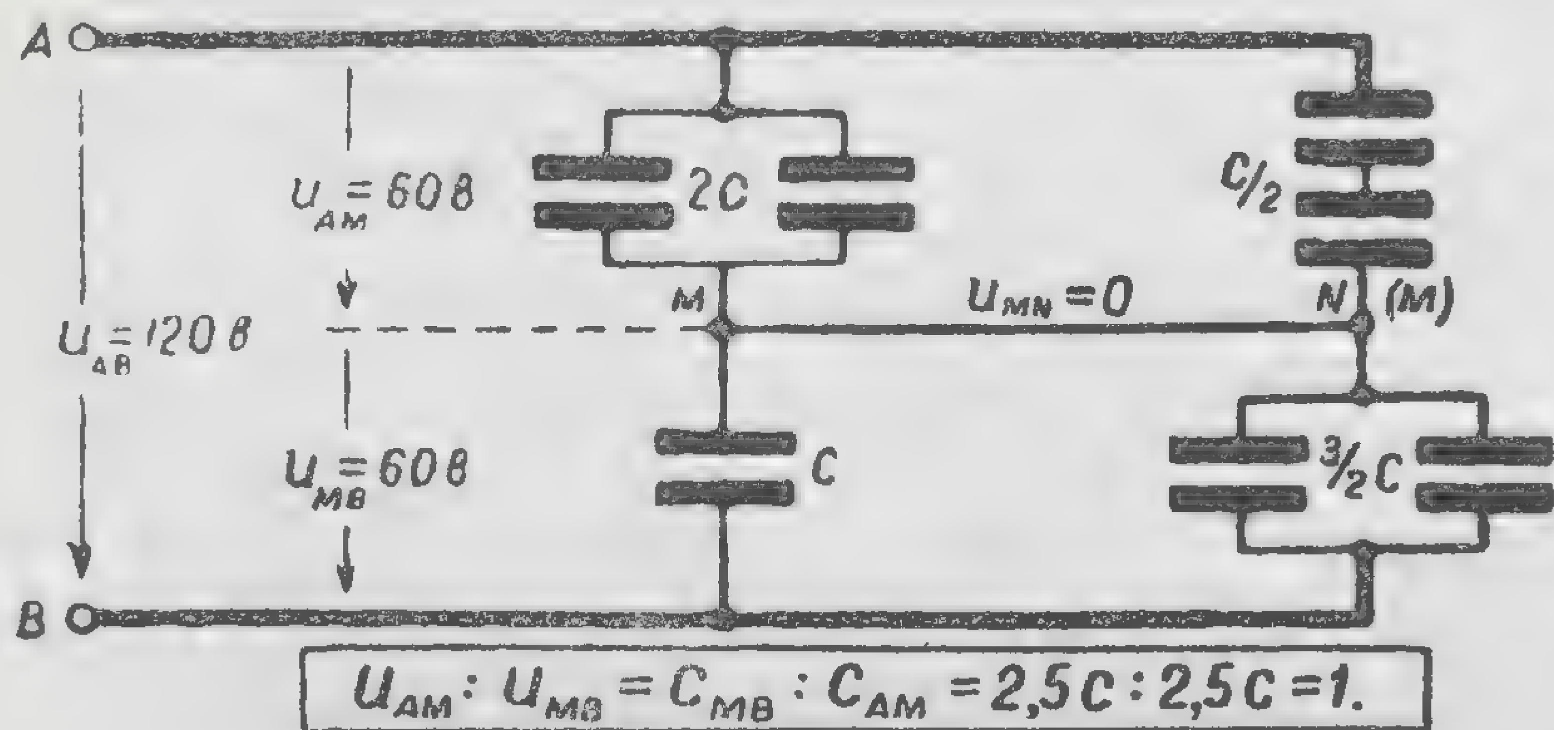


График потенциала ($\varphi_B=0$)



$U_{AM}:U_{MB}=C_{MB}:C_{AM}=2{,}5C:2{,}5C=1.$

Последовательное соединение двух разветвлённых участков

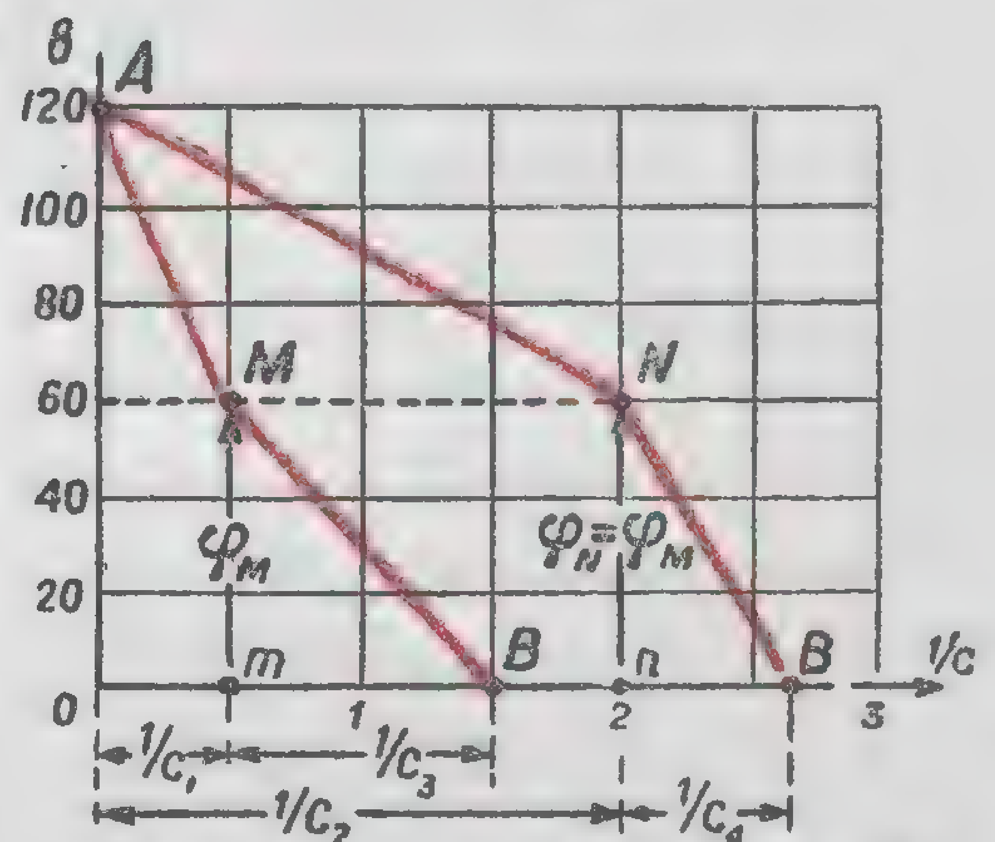
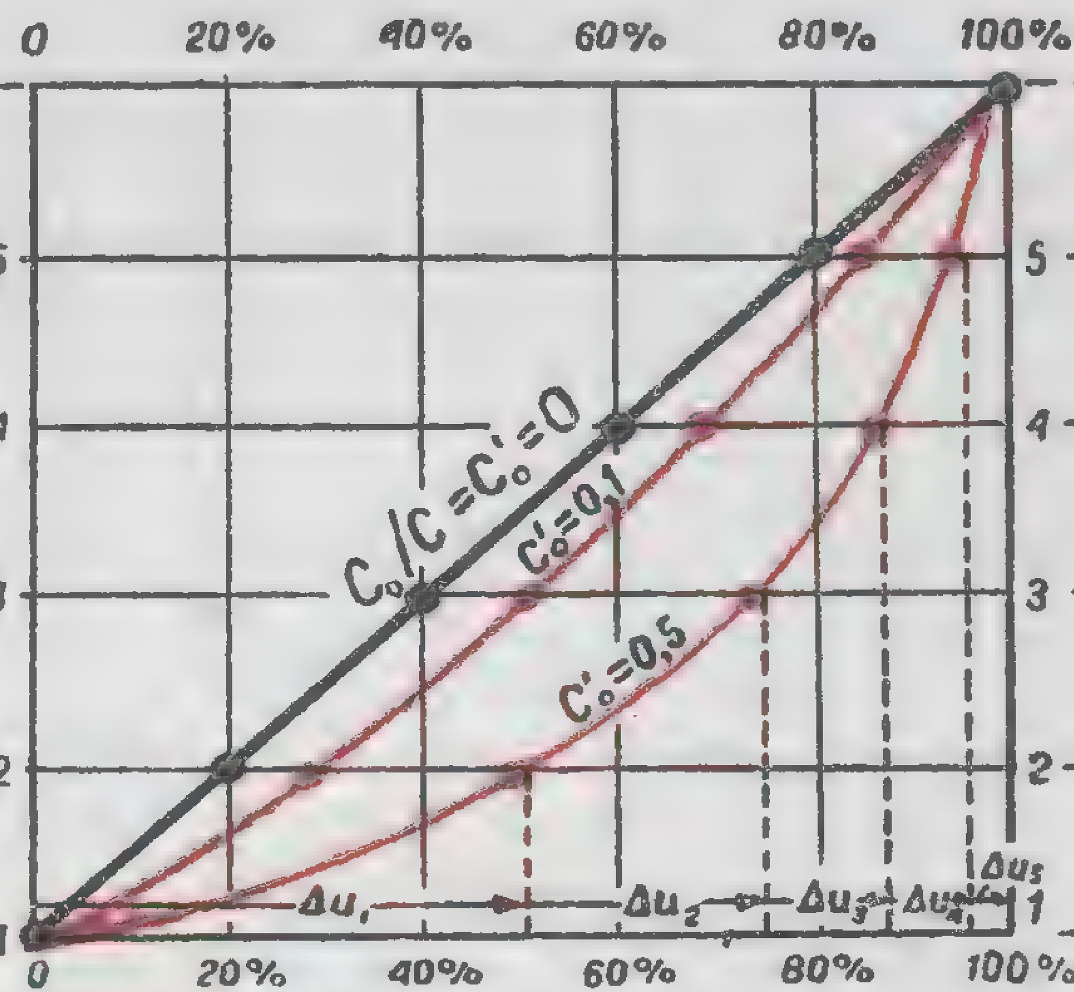


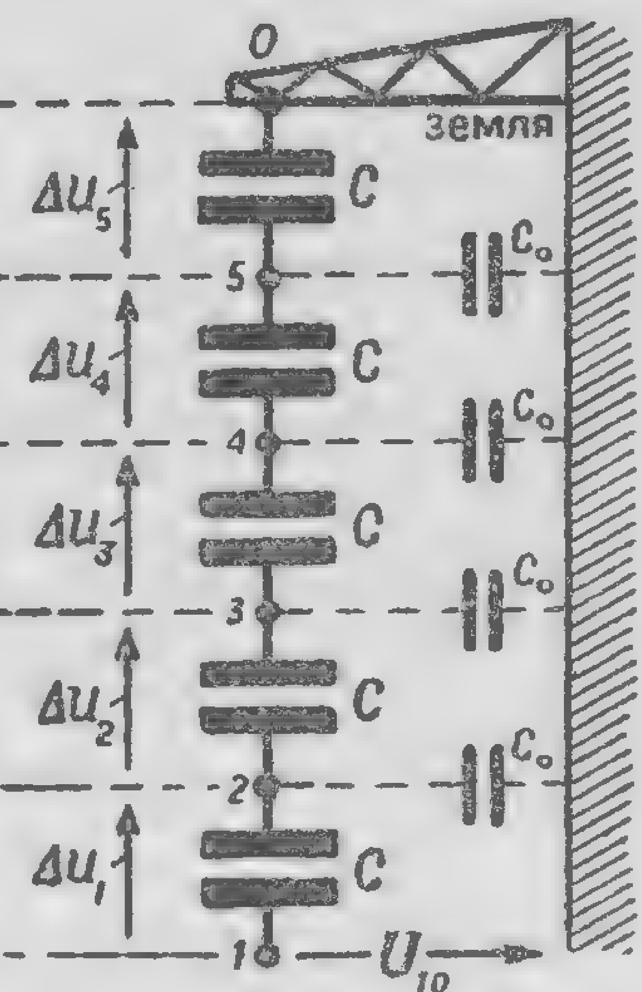
График потенциала ($\varphi_B=0$)



Гирлянда подвесных изоляторов



Кривые распределения напряжений вдоль гирлянды



Приближенная схема замещения

$$C_{50}=C+C_o\ ;\quad C_{40}=\frac{C_{50}\cdot C}{C_{50}+C}+C_o\ ;\quad C_{20}=\frac{C_{30}\cdot C}{C_{30}+C}+C_o$$

В относительных единицах ($C_o'=C_o/c$):

$$C_{50}'=\frac{C_{50}}{C}=1+C_o'\ ;\quad C_{40}'=\frac{C_{50}'}{C_{50}'+1}+C_o'\ ;\quad C_{20}'=\frac{C_{30}'}{C_{30}'+1}+C_o'$$

Расчет емкостей

$$\frac{U_{12}}{U_{20}}=\frac{C_{20}}{C}=C_{20}'\ ;\quad \frac{U_{23}}{U_{30}}=C_{30}'\ ;\quad \frac{U_{34}}{U_{40}}=C_{40}'\ ;\quad \frac{U_{45}}{U_{50}}=C_{50}'$$

Следовательно

$$\Delta U_1=U_{12}=U_{10}\frac{C_{20}'}{C_{20}'+1}\ ;\quad U_{20}=U_{10}-\Delta U_1\ ;\quad \Delta U_2=U_{23}=U_{20}\frac{C_{30}'}{C_{30}'+1}\ \text{и т.д.}$$

Расчет напряжений

НЕРАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВДОЛЬ ГИРЛЯНДЫ ПОДВЕСНЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

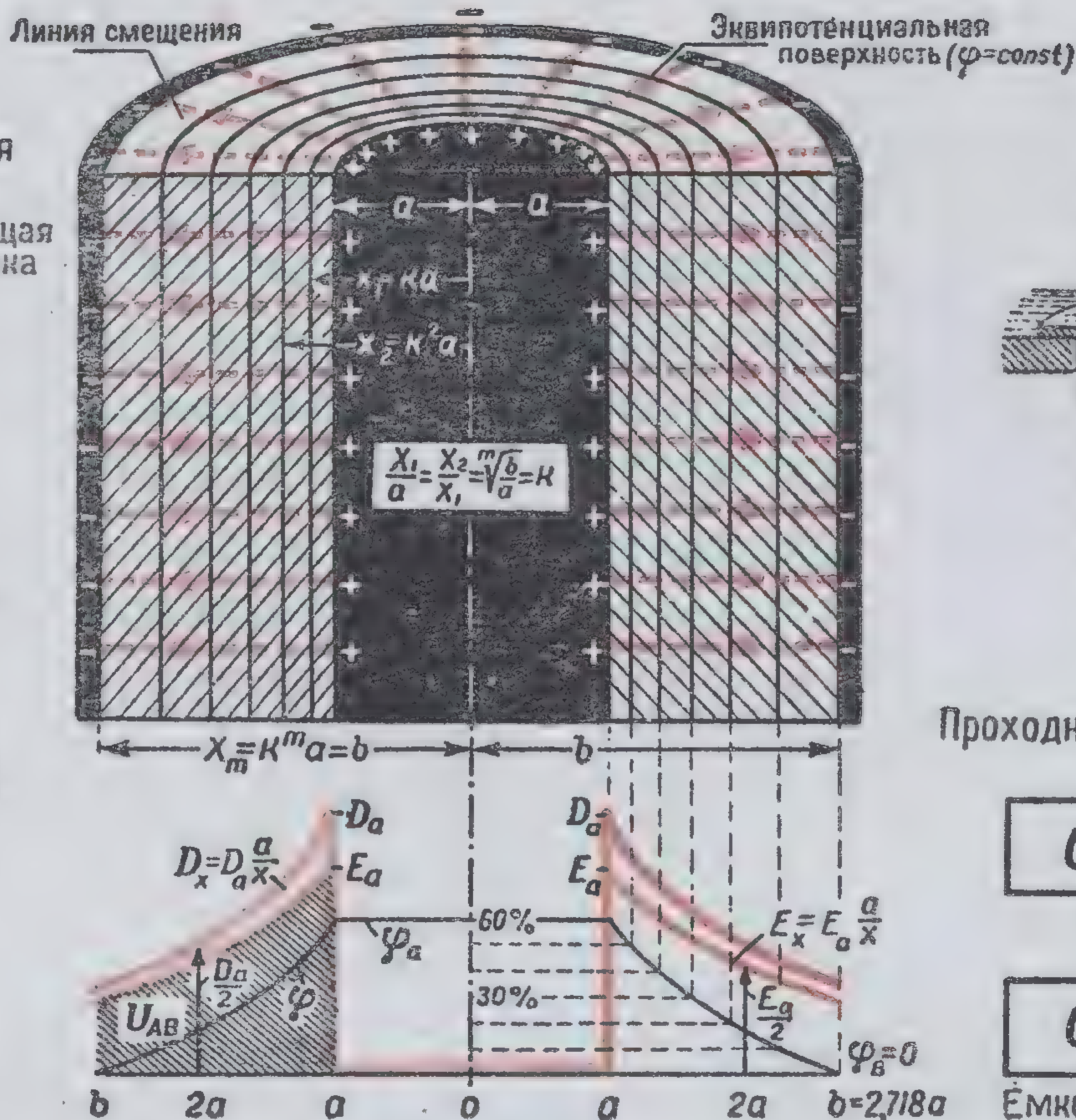
Э.И.Расовский

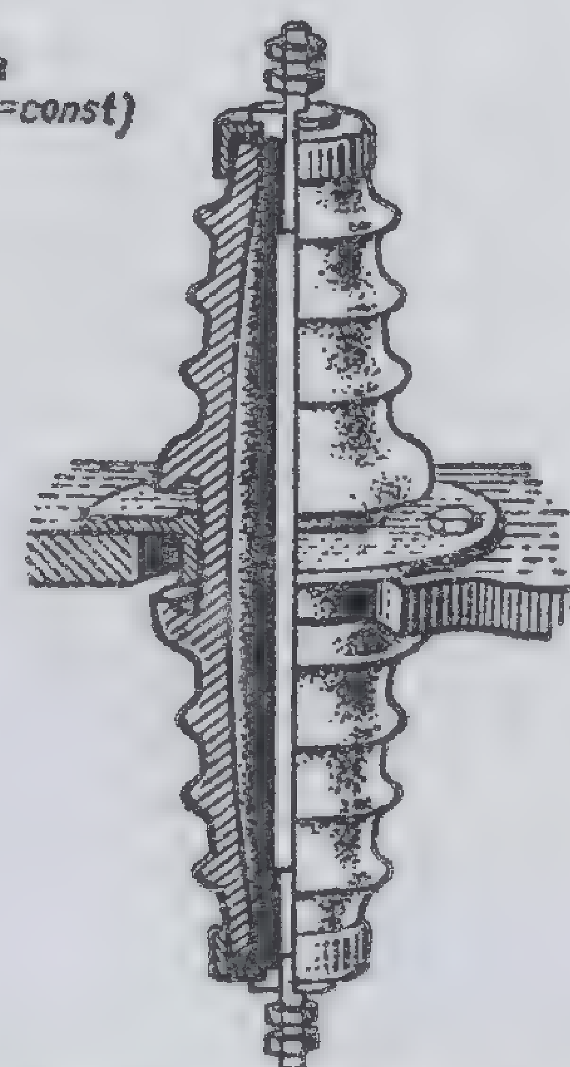
Худ. А. Меньшиков

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ КОНДЕНСАТОР



Коаксиальный кабель





Проходной изолятор на 30 кv

$$E_x = \frac{D_x}{\varepsilon} = \frac{Q}{2\pi\varepsilon x l}$$

или

$$E_x = \frac{U_{AB}}{x \ln b/a} = E_a \frac{a}{x} \quad \frac{в}{см}$$

Напряженность электрического поля

$$U_{проб} = E_{проб} \cdot a \ln\frac{b}{a} \quad в$$

Пробивное напряжение

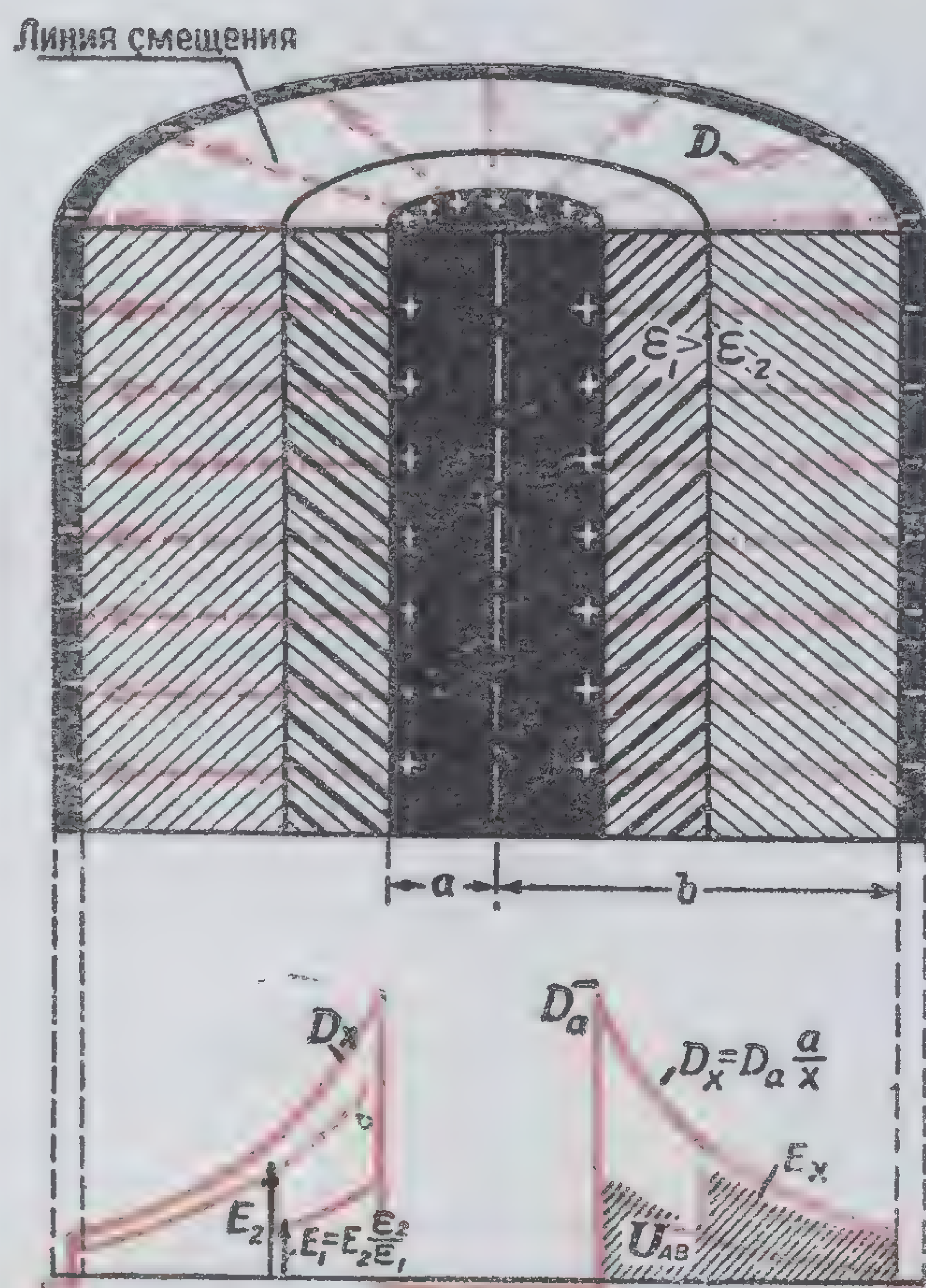
$$C = \frac{2\pi\varepsilon l}{\ln b/a} \quad ф$$

Ёмкость

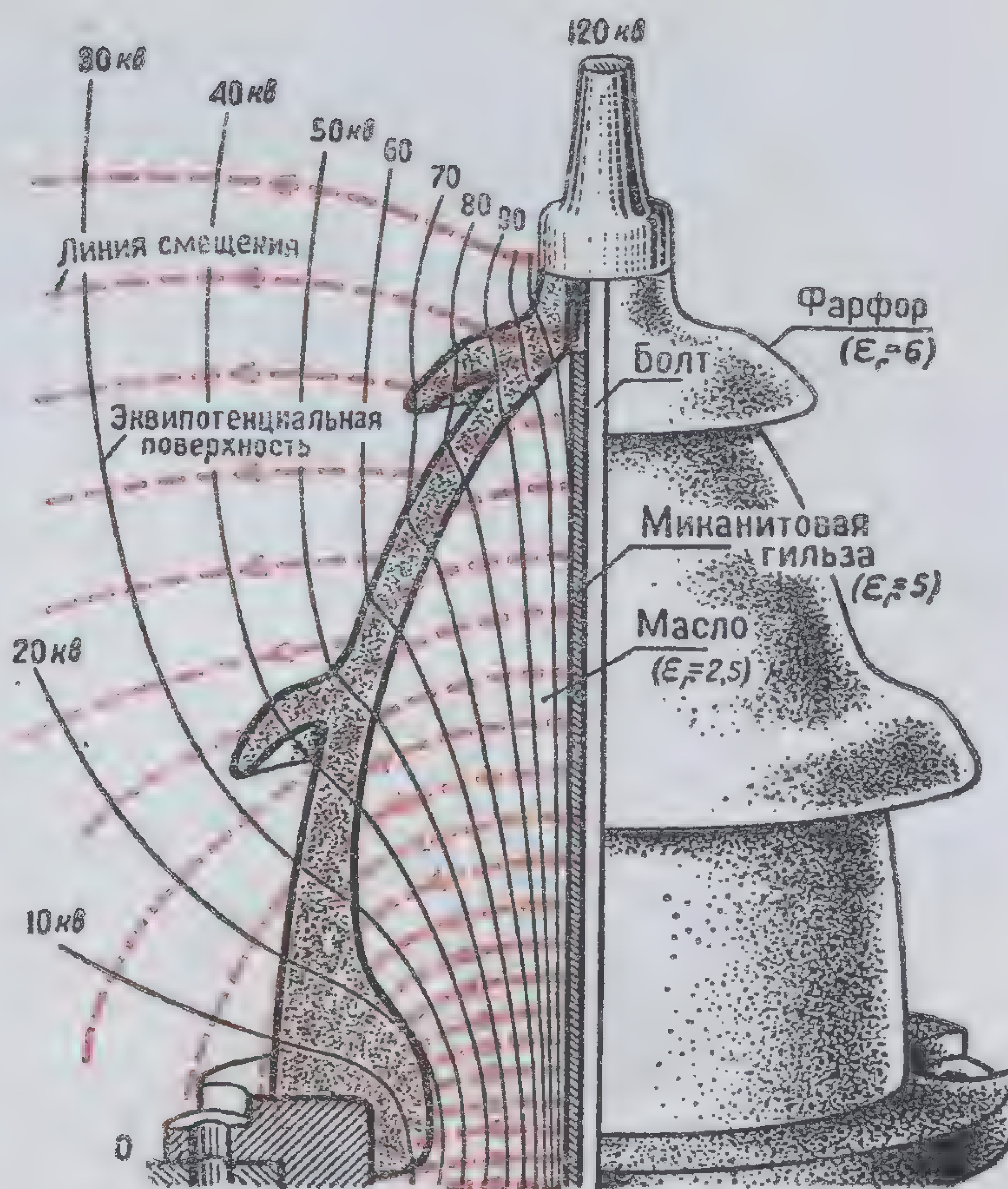
$$C_0 = \frac{\varepsilon_r}{18 \ln b/a} \quad \frac{мкф}{км}$$

Ёмкость на километр

ПОЛЕ И ЕМКОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРА



ДВУХСЛОЙНЫЙ КОНДЕНСАТОР
(разгрузка внутренних слоёв диэлектрика : $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$).



МАСЛОНАПОЛНЕННЫЙ ПРОХОДНОЙ ИЗОЛЯТОР

Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

ДВУХПРОВОДНАЯ ЛИНИЯ

d

Наложение линий смещения.

Наложение эквипотенциальных поверхностей.

A

B

Результирующее поле.

$E_x = E'_x + E''_x = \frac{Q}{2\pi\varepsilon l}\left(\frac{1}{x}+\frac{1}{d-x}\right)$

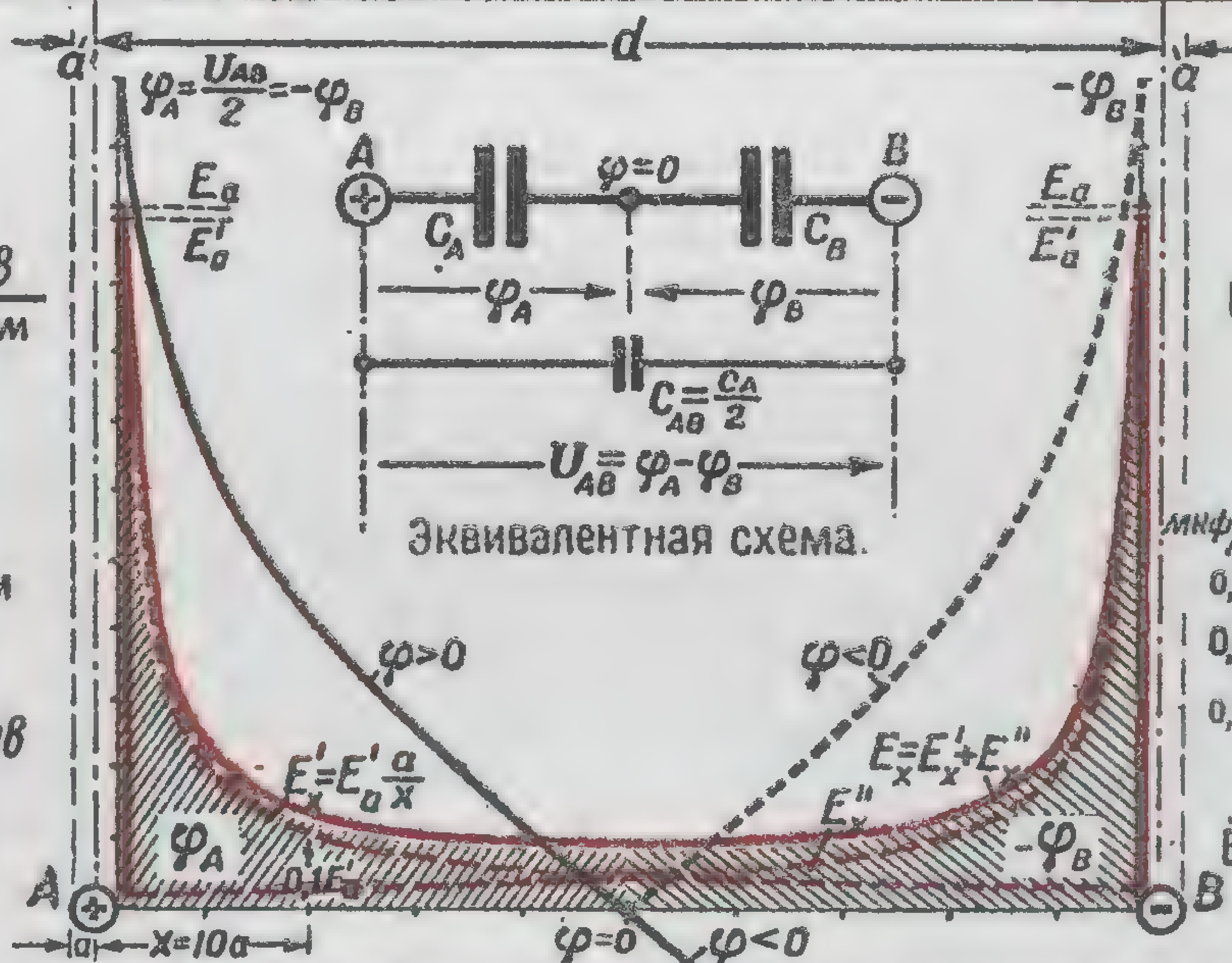
или

$E_x = \frac{U_{AB}}{2\ln\frac{d-a}{a}}\left(\frac{1}{x}+\frac{1}{d-x}\right)$ $\frac{в}{см}$

Напряженность электрического поля вдоль горизонтальной оси

$U_{кор} \approx E_{прев} \cdot 2a\ln\frac{d}{a}$ кв

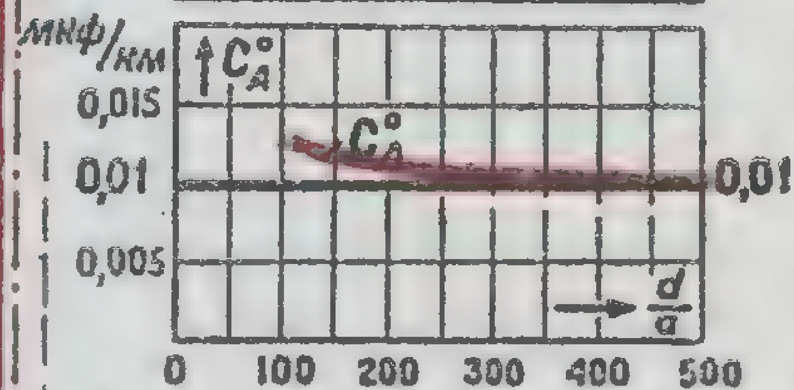
Напряжение короны



$C_{AB} = \frac{Q}{U_{AB}} = \frac{\pi\varepsilon l}{\ln\frac{d-a}{a}}$ ф

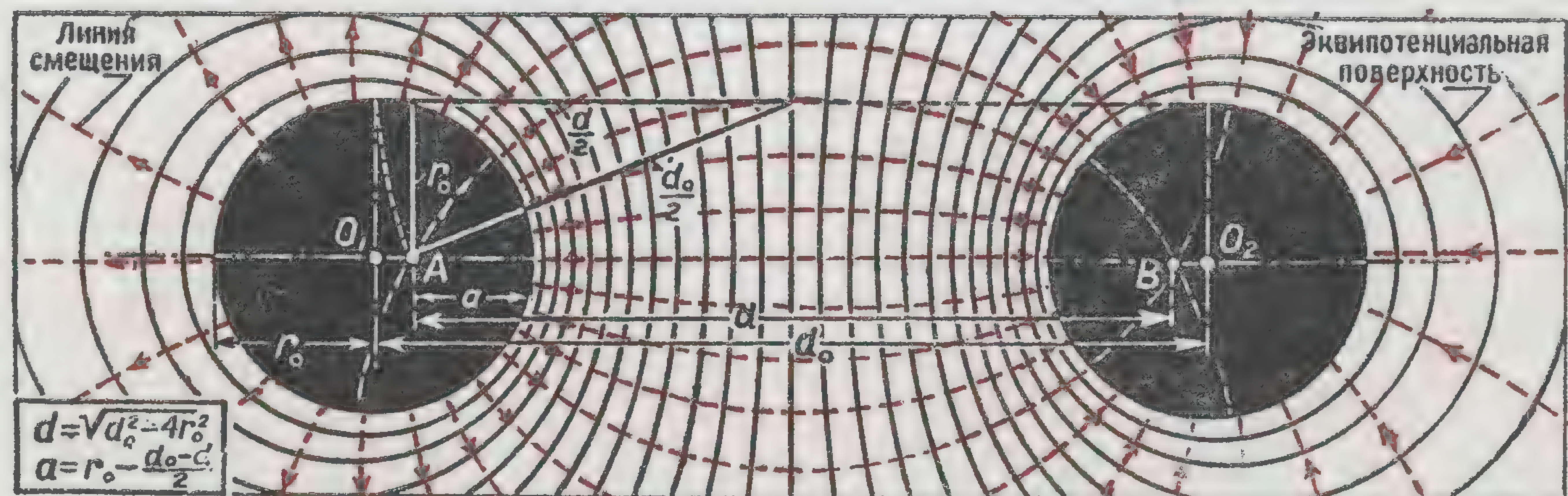
Ёмкость двухпроводной линии

$C^\circ_A = \frac{Q^\circ_A}{\varphi_A} = \frac{1}{18\ln\frac{d-a}{a}}$ $\frac{мкф}{км}$



Ёмкость одного провода на километр

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ КАК РЕЗУЛЬТАТ НАЛОЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОБОИХ ПРОВОДОВ

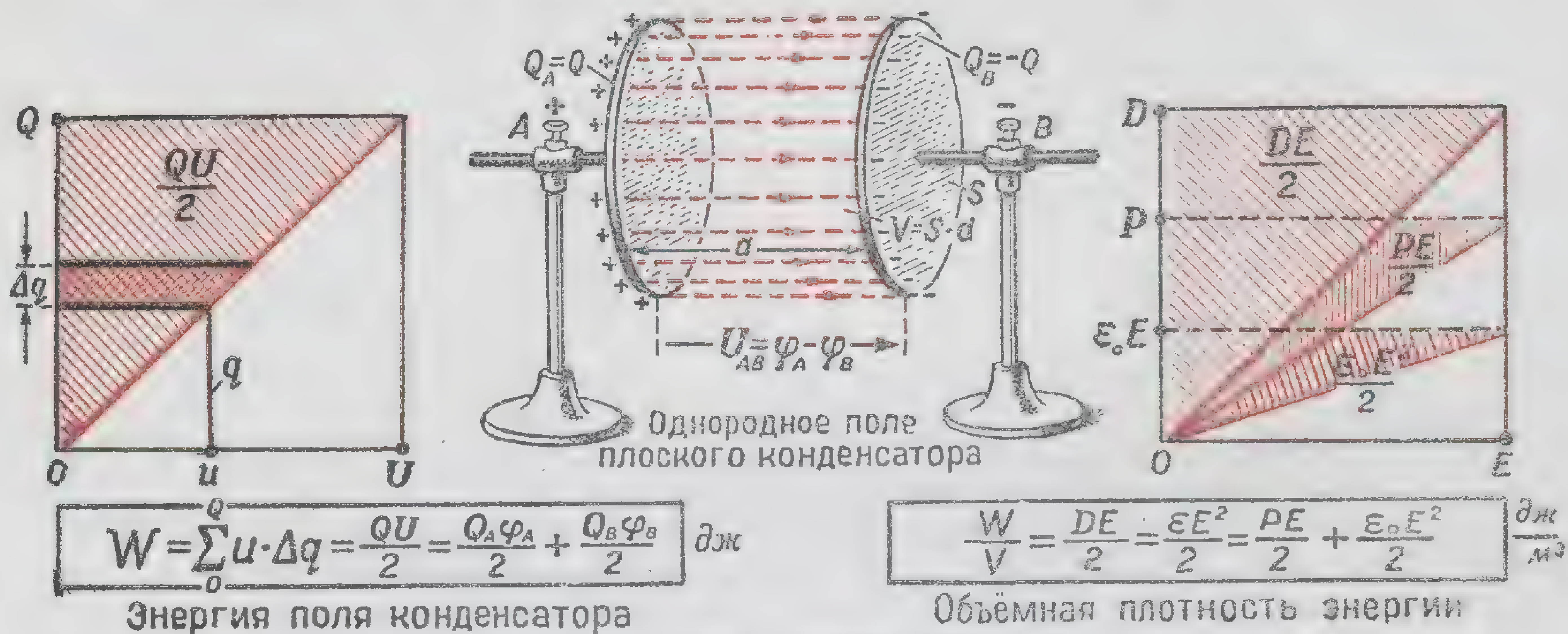


ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ

Э.И.Расовский.

Худ. А.Меньшиков

ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



Однородное поле плоского конденсатора

$$W=\sum_0^Q u\cdot\Delta q=\frac{QU}{2}=\frac{Q_A\varphi_A}{2}+\frac{Q_B\varphi_B}{2}\ \text{дж}$$

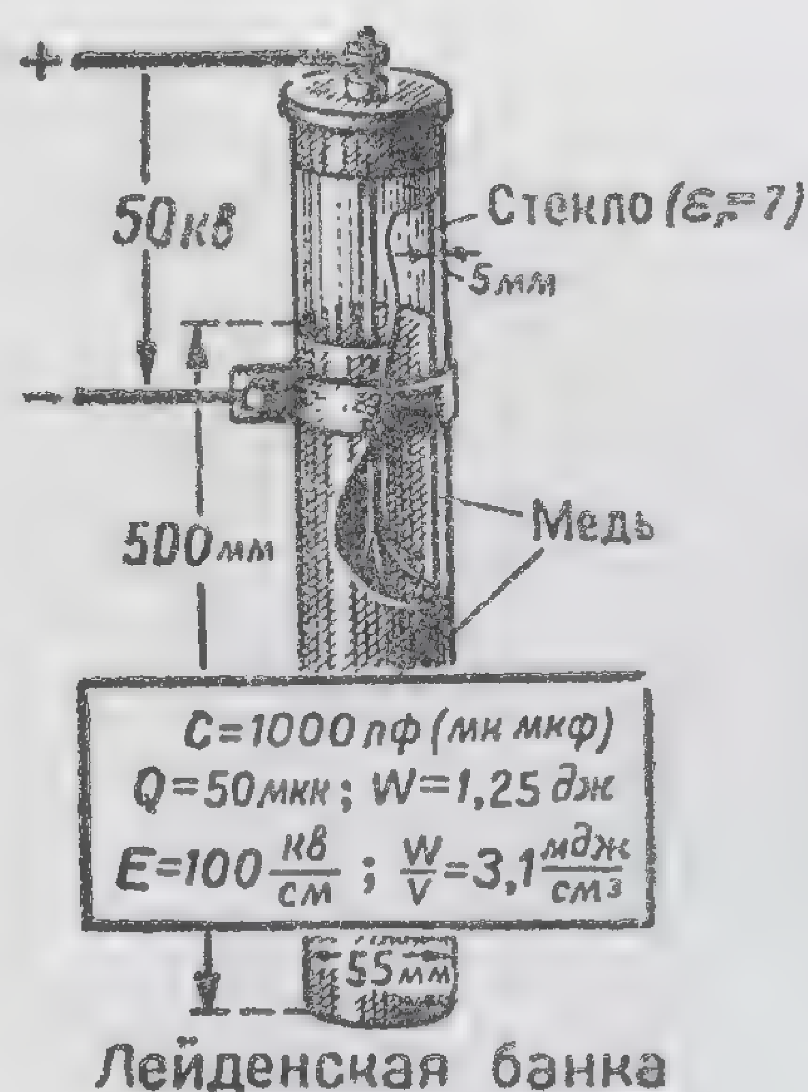
Энергия поля конденсатора

$$\frac{W}{V}=\frac{DE}{2}=\frac{\varepsilon E^2}{2}=\frac{PE}{2}+\frac{\varepsilon_0 E^2}{2}\ \frac{\text{дж}}{\text{м}^3}$$

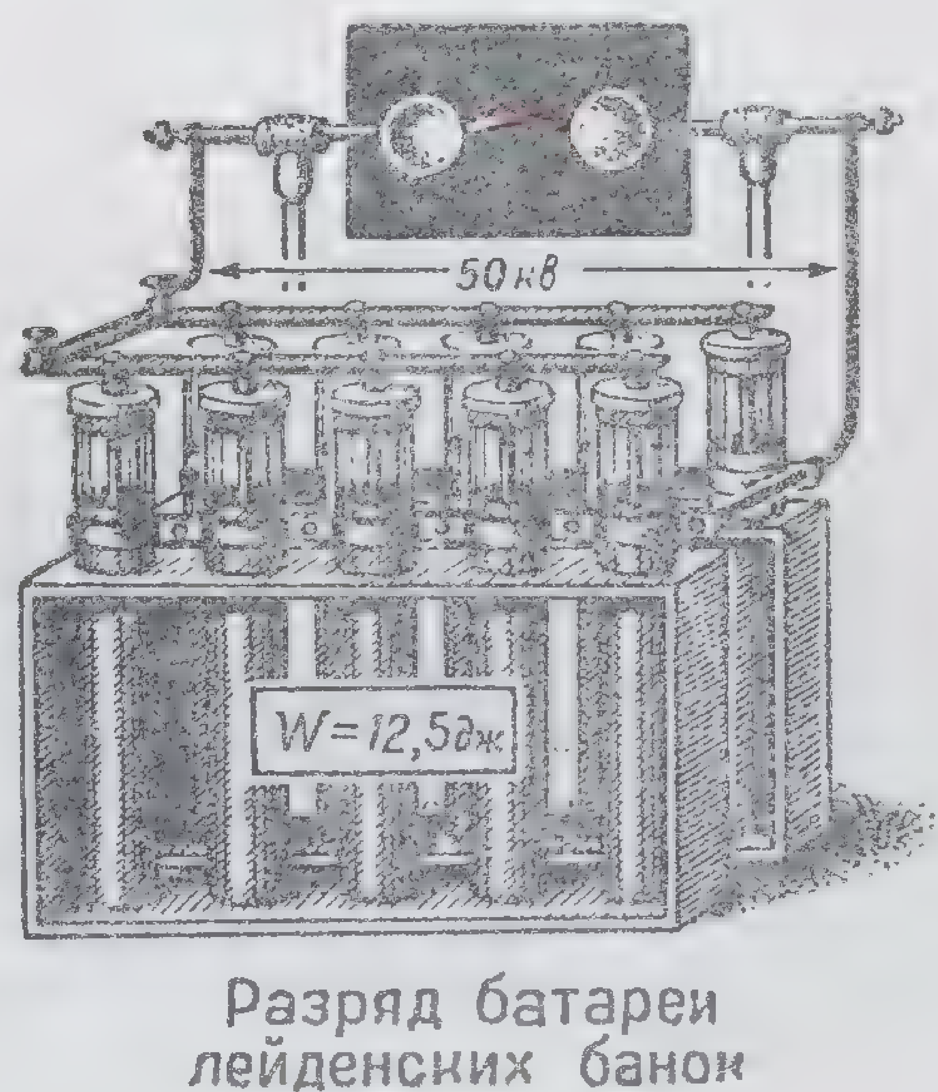
Объёмная плотность энергии

$$W_e=\sum\frac{Q\varphi}{2}=\sum\frac{DE}{2}\Delta V\ \text{дж}$$

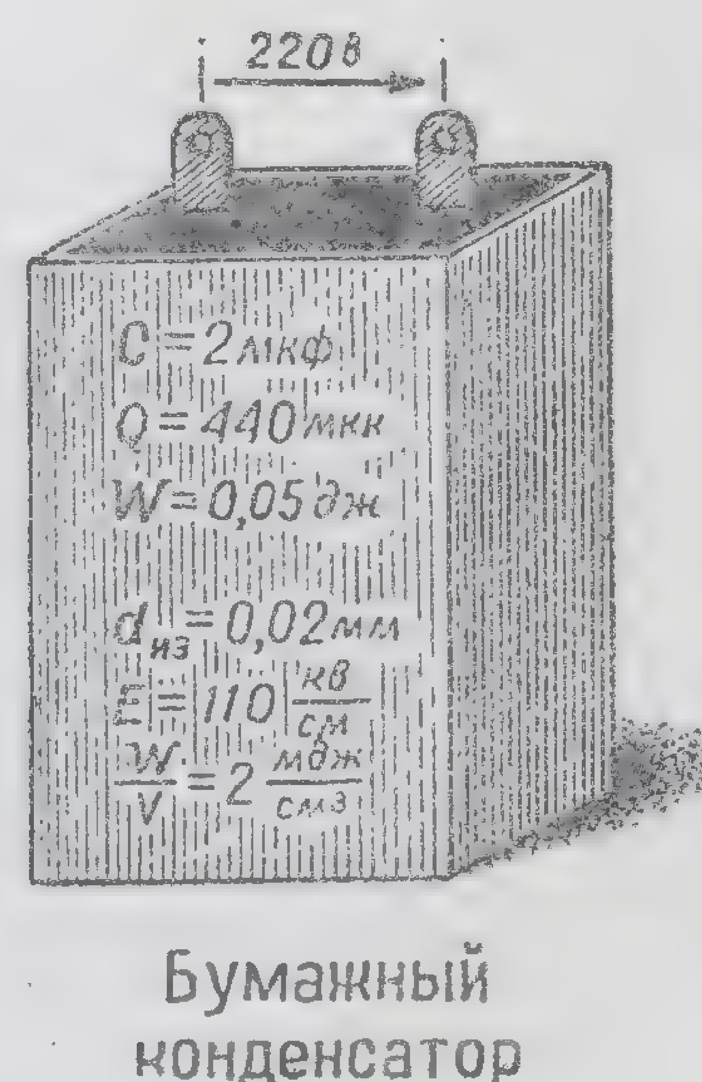
ЭНЕРГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ



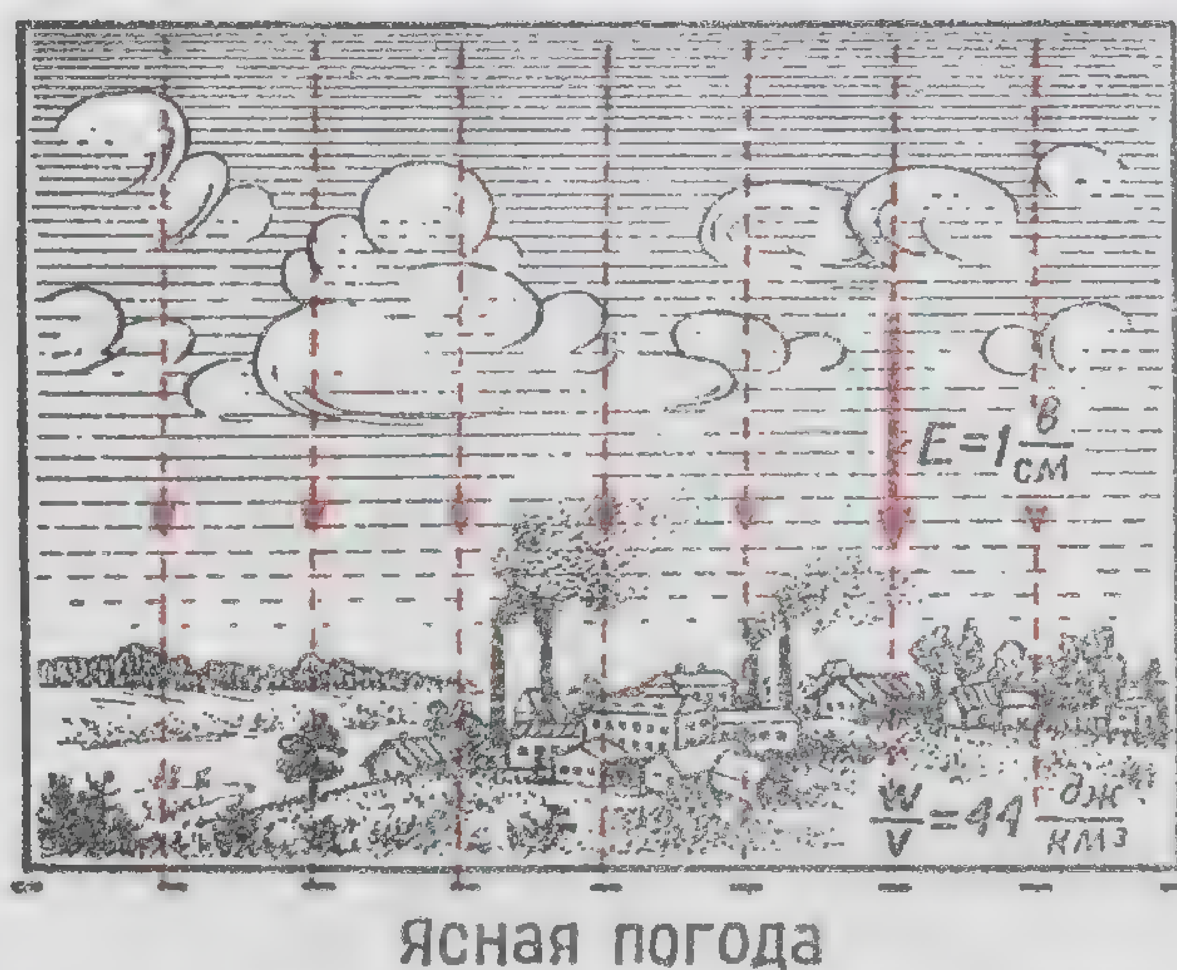
Лейденская банка



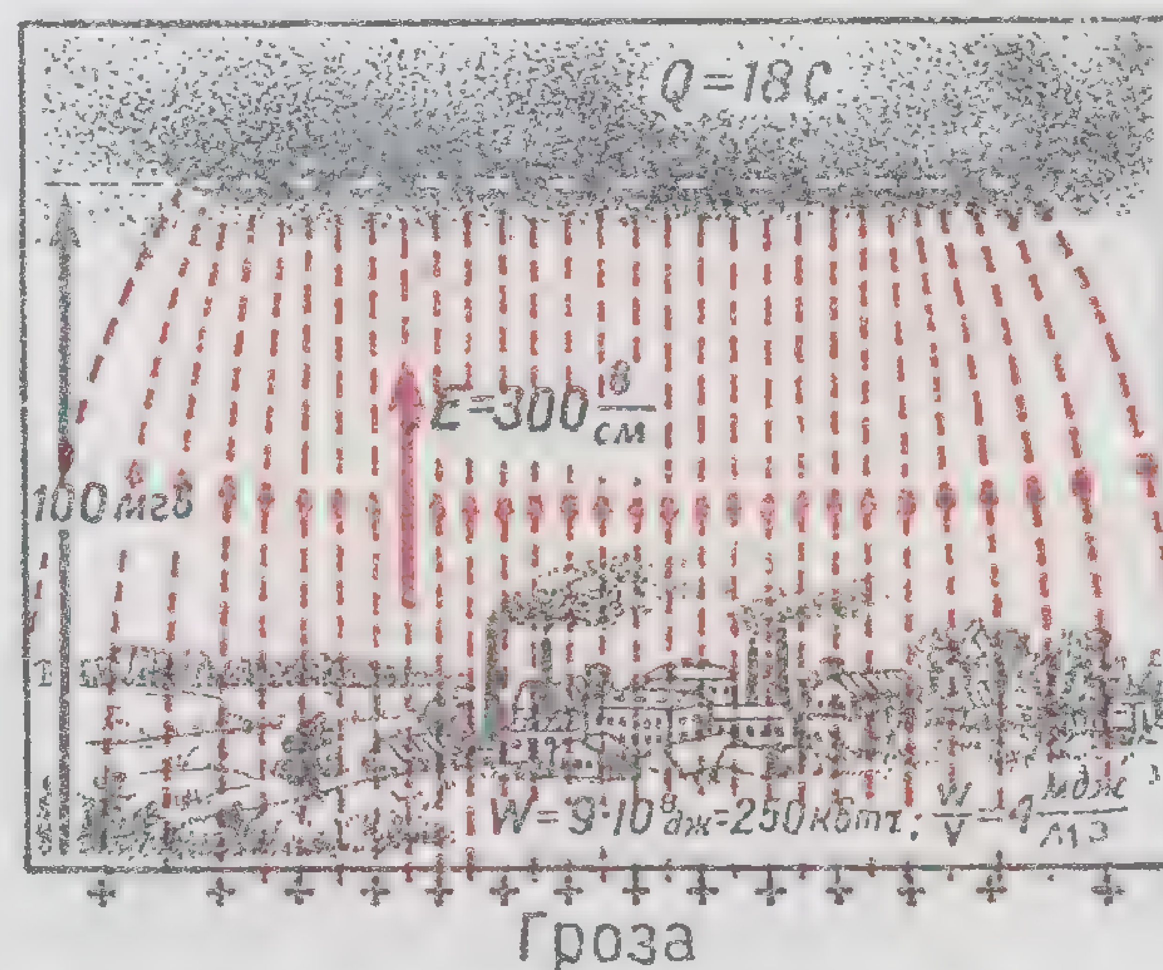
Разряд батареи лейденских банок



Бумажный конденсатор



Ясная погода



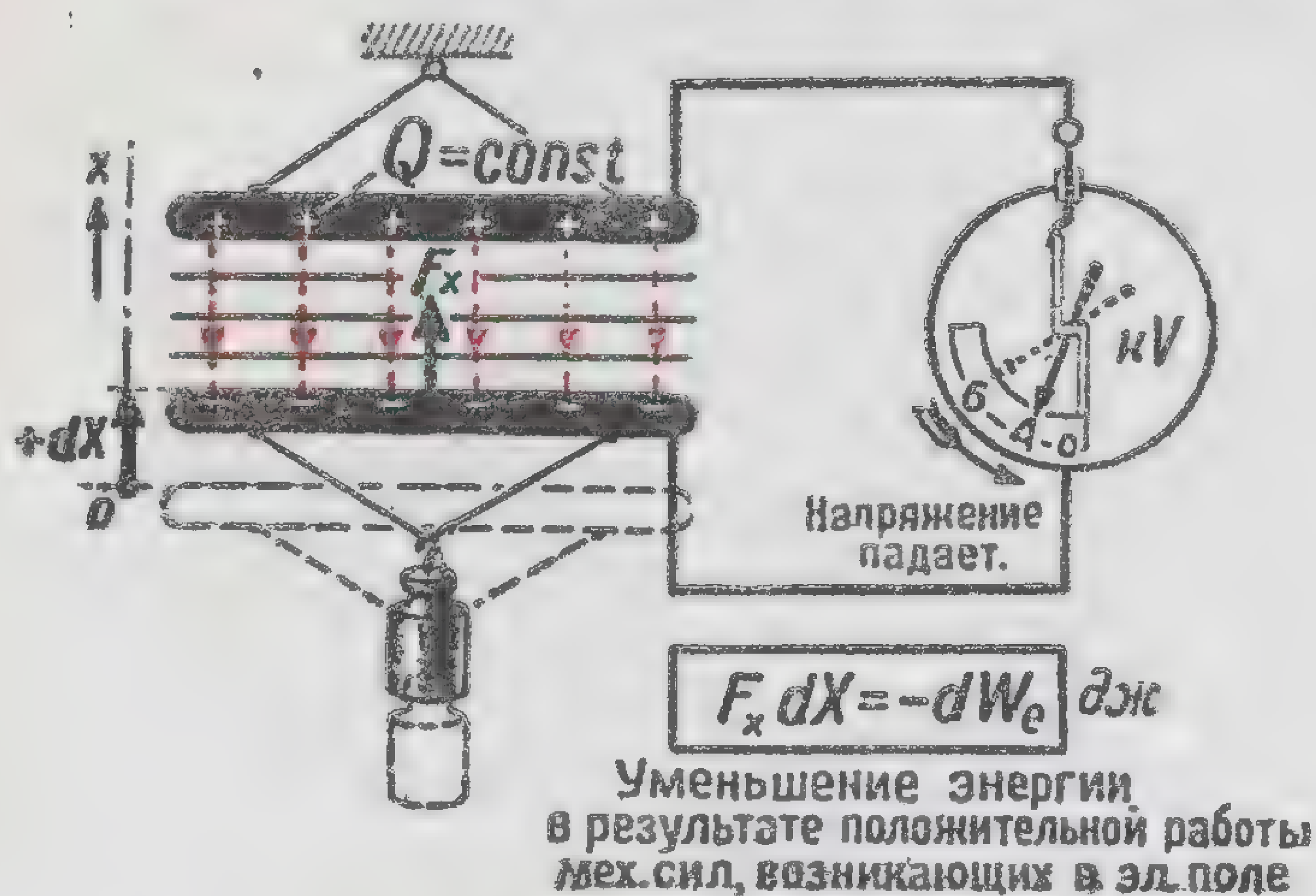
Гроза

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ЗЕМЛИ

Э.И.Расовский

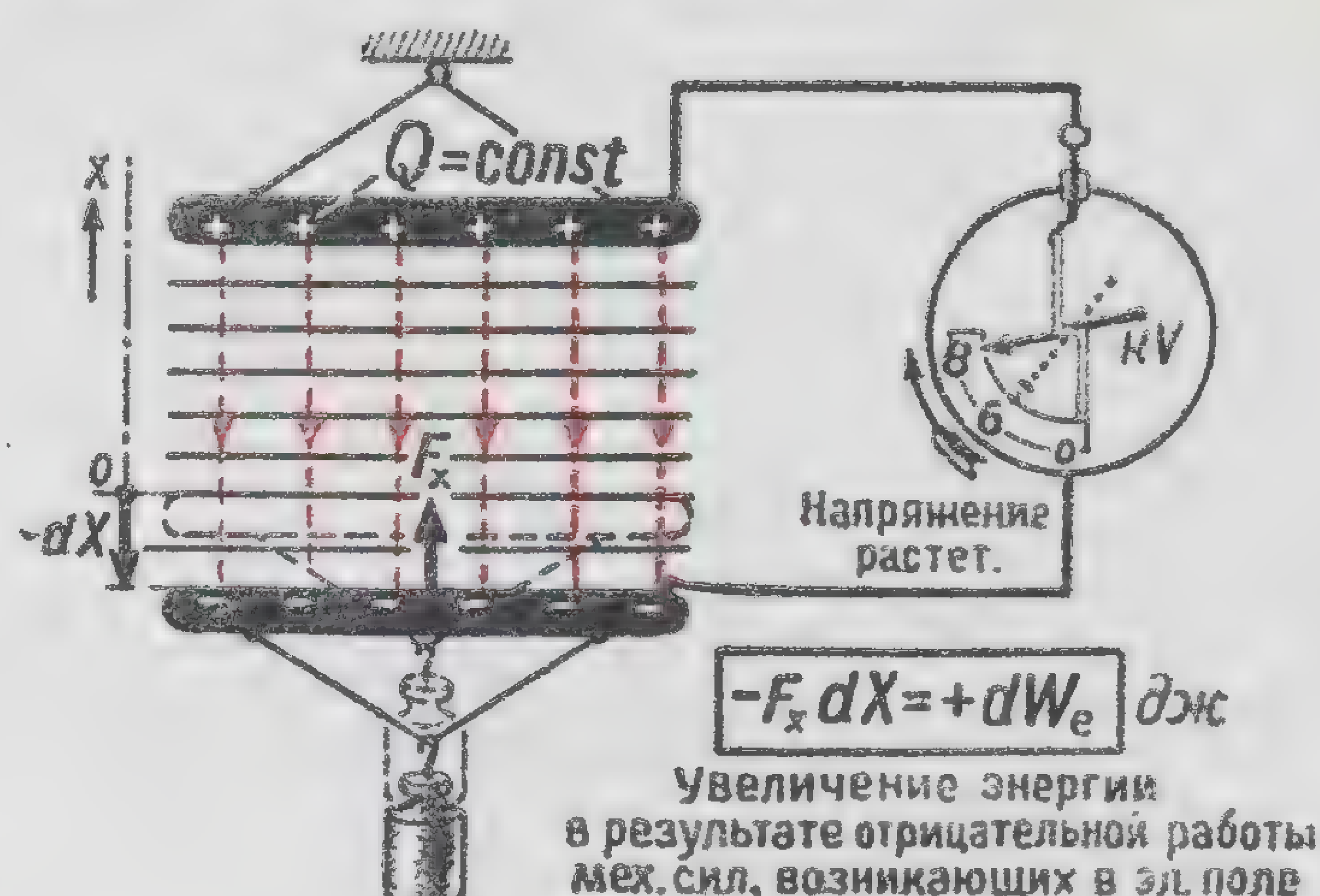
Худ. А.Меньшиков

МЕХАНИЧЕСКИЕ СИЛЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ



$F_x dX = -dW_e$ дж

Уменьшение энергии в результате положительной работы мех. сил, возникающих в эл. поле

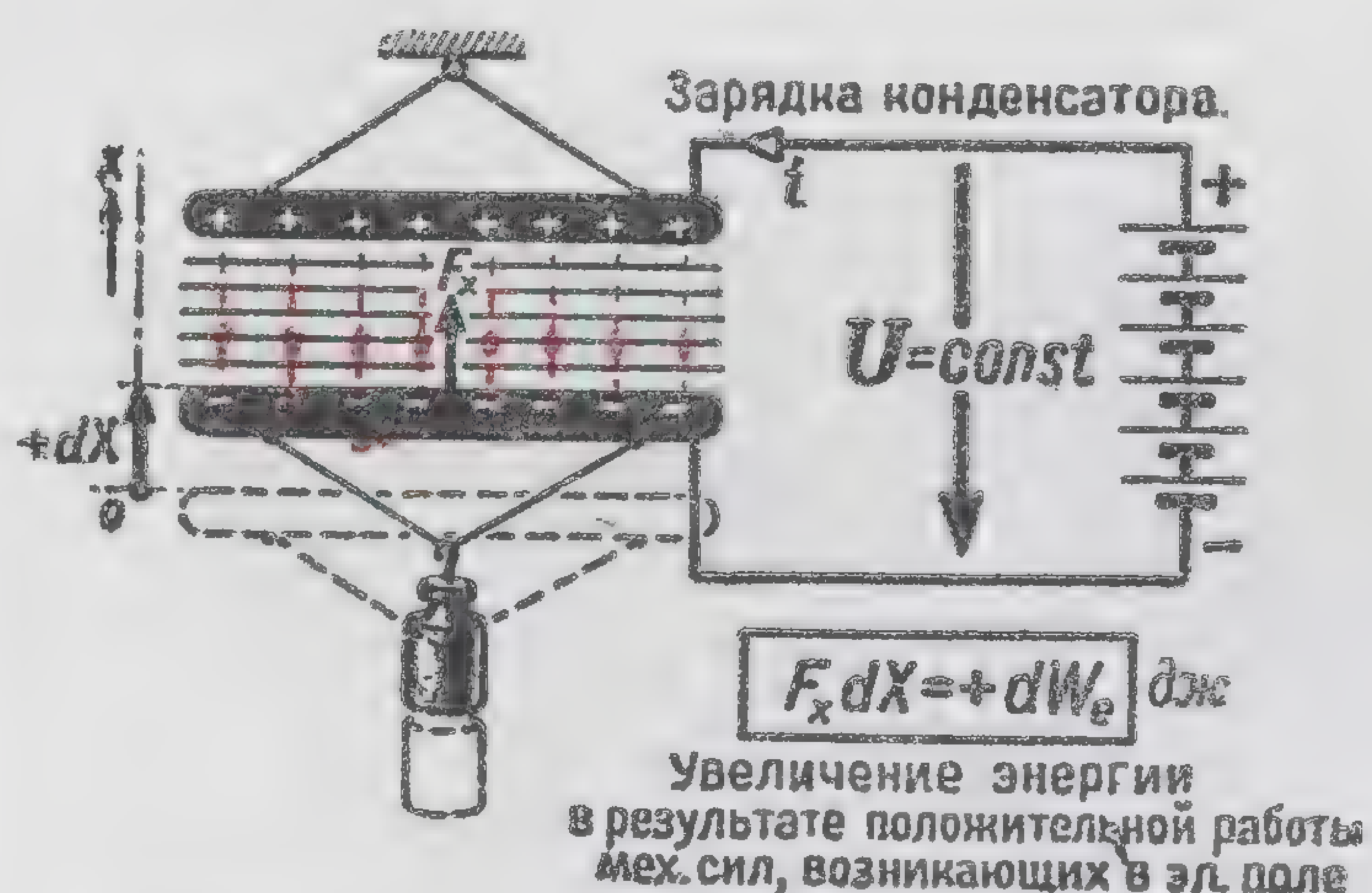


$-F_x dX = +dW_e$ дж

Увеличение энергии в результате отрицательной работы мех. сил, возникающих в эл. поле

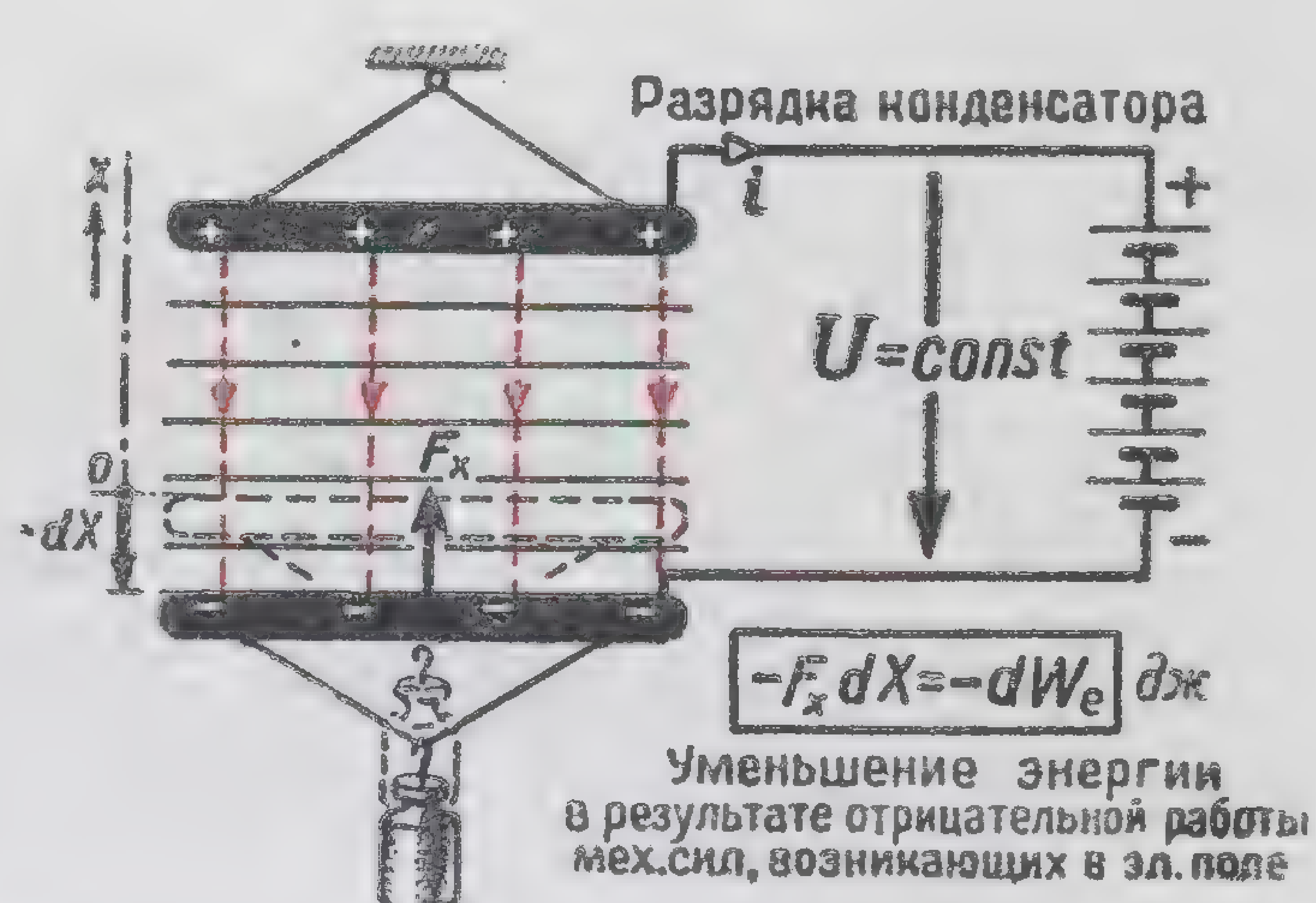
$dA = F_x dx = -dW_e$ дж	Работа механических сил равна **УБЫЛИ** энергии электрического поля системы
$F_x = -\frac{dW_e}{dx}$ $\frac{дж}{м}$	Механическая сила „стремится" **УМЕНЬШИТЬ** энергию электрического поля системы

СИСТЕМА С ОТКЛЮЧЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ($Q=const$)



$F_x dX = +dW_e$ дж

Увеличение энергии в результате положительной работы мех. сил, возникающих в эл. поле



$-F_x dX = -dW_e$ дж

Уменьшение энергии в результате отрицательной работы мех. сил, возникающих в эл. поле

$dA = F_x dx = +dW_e$ дж	Работа механических сил равна **ПРИРАЩЕНИЮ** энергии электрического поля системы
$F_x = +\frac{dW_e}{dx}$ $\frac{дж}{м}$	Механическая сила „стремится" **УВЕЛИЧИТЬ** энергию электрического поля системы

СИСТЕМА С ПРИКЛЮЧЕННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ($\varphi=const$)

$F_x = \pm\frac{dW_e}{dx} = \frac{U^2}{2}\frac{dC}{dx}$ $\frac{дж}{м}$ (н)

Механические силы, действующие на обкладки конденсатора „стремятся" увеличить его ёмкость



$\frac{F}{S} = \frac{DE}{2}$ $\frac{дж/м}{м^2}$ $\left(\frac{дж}{м^3}\right)$

Сила тяжения, приходящаяся на единицу поверхности, равна объёмной плотности энергии



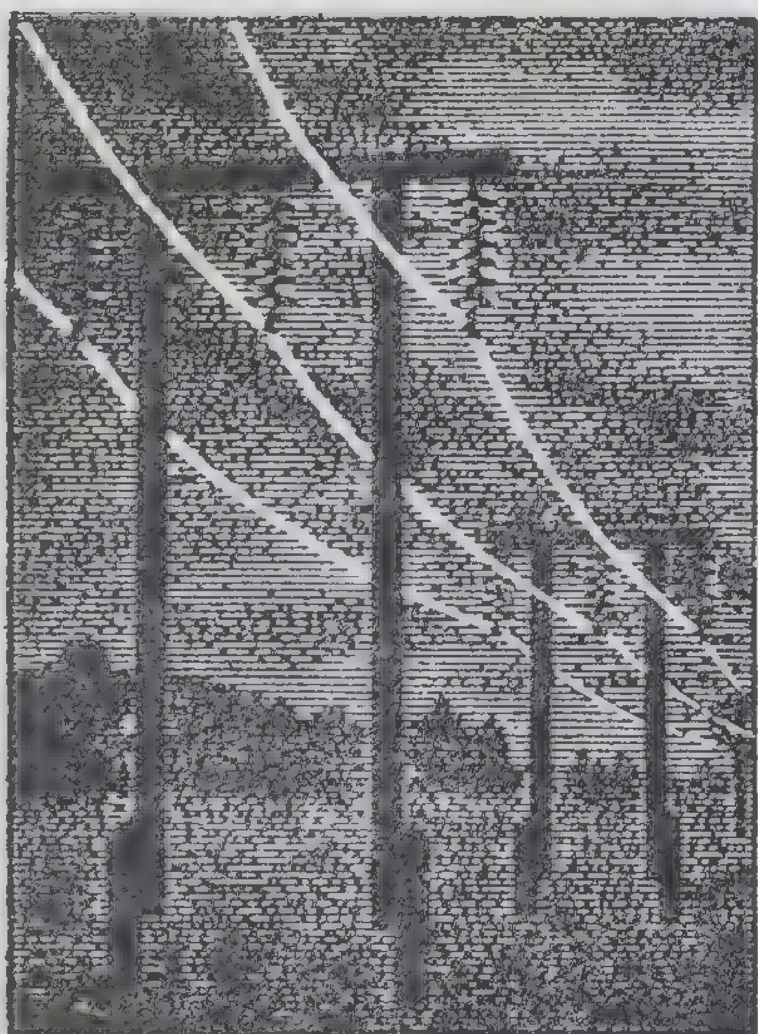
$F\cdot r = \frac{U^2}{2}\frac{dC}{d\alpha}$ дж

Вращающий момент электростатического прибора

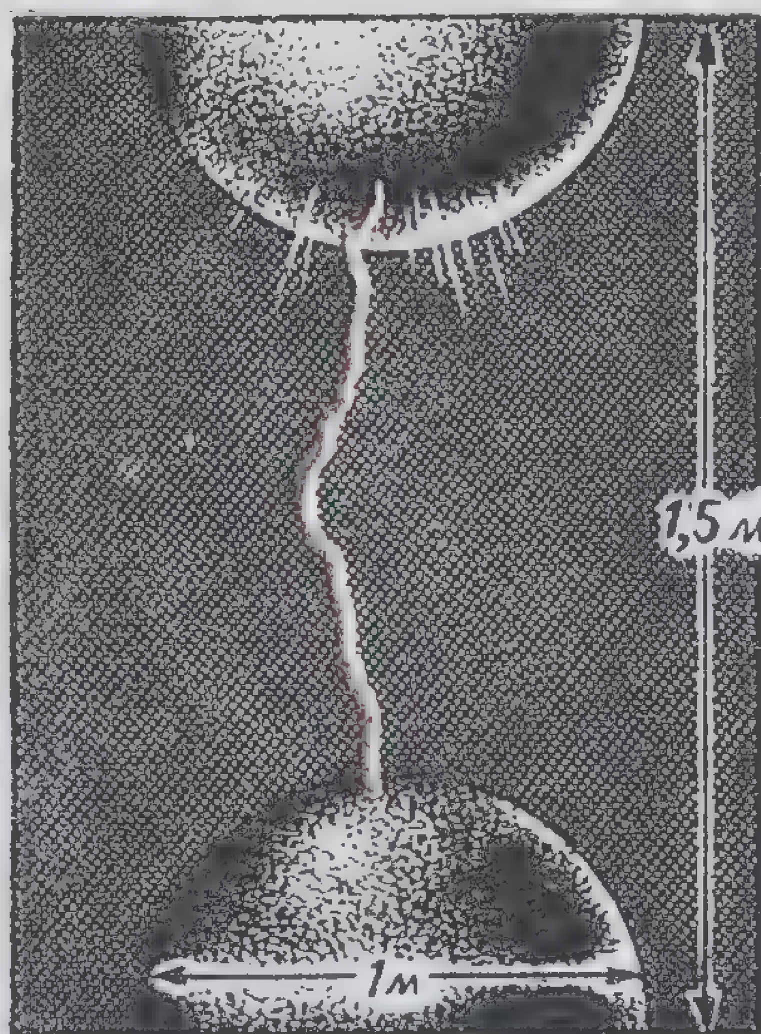
З.И.Расовский

Худ А. Меньшиков

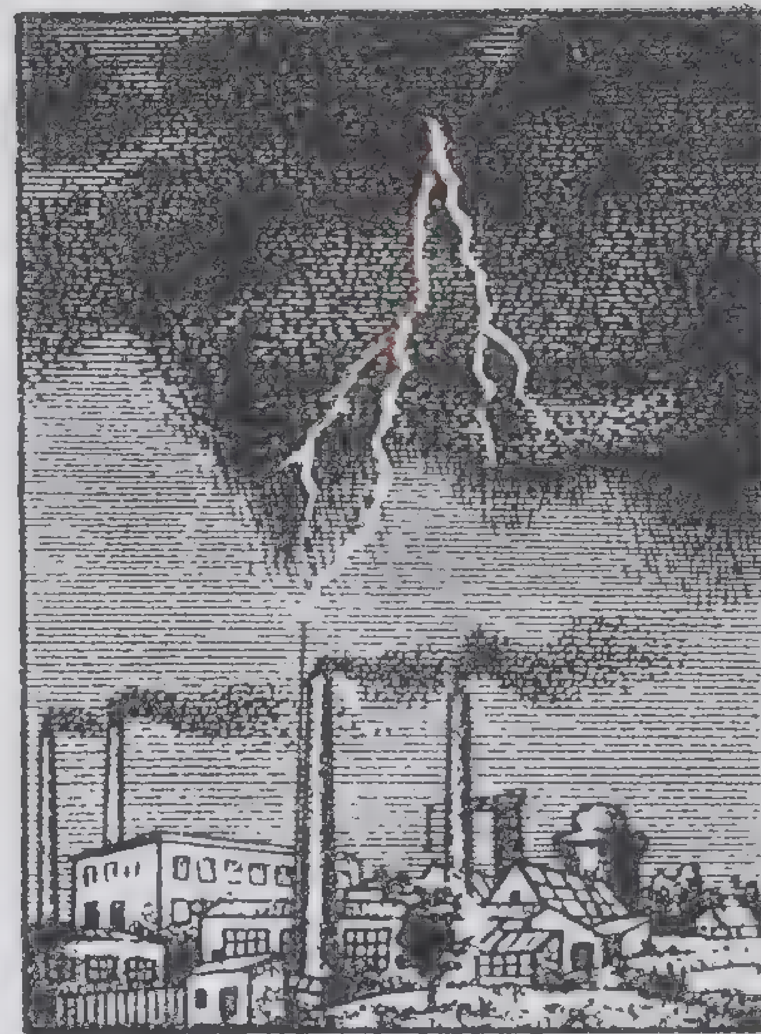
ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКА



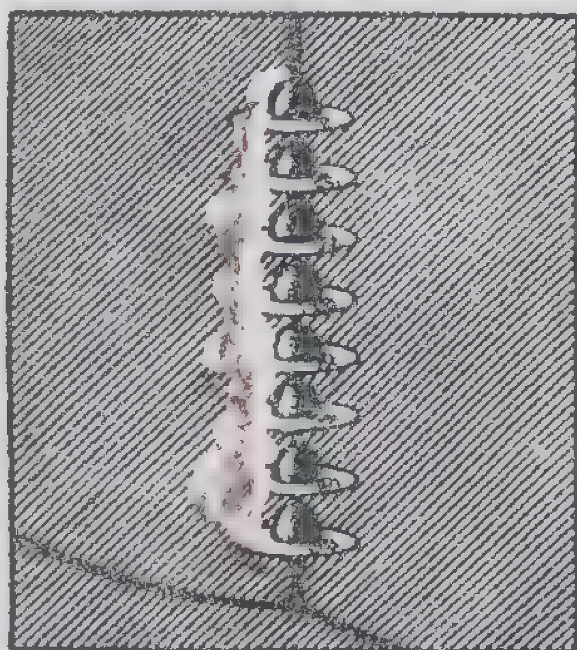
Корона на проводах высоковольтной линии



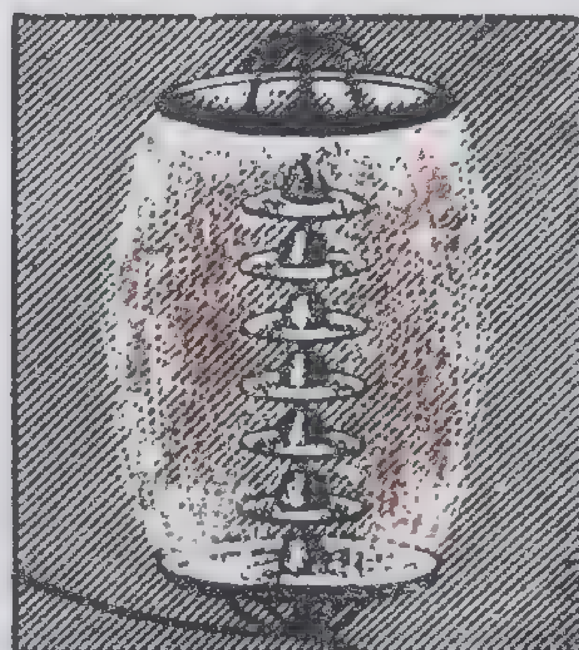
Искровое перекрытие между шарами



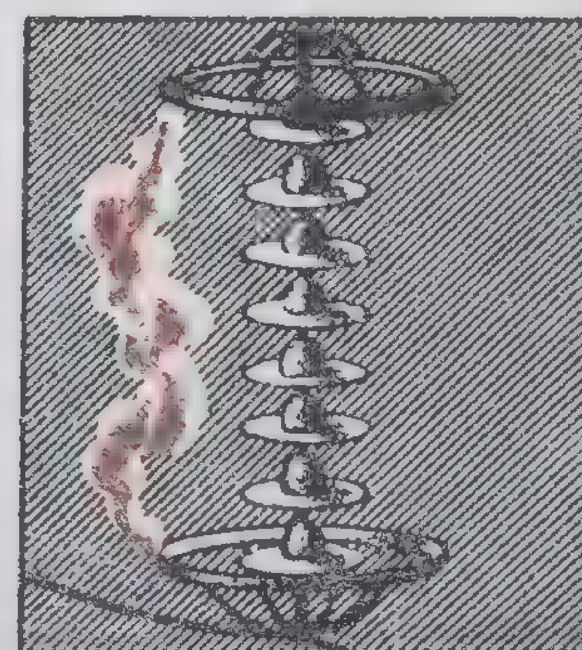
Молния
(U=100 мгв ; I=10000 а)



Поверхностный разряд по гирлянде подвесных изоляторов

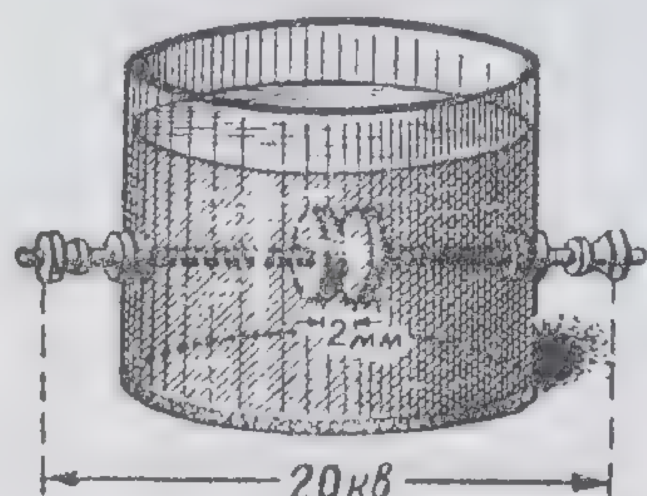


Корона на гирлянде с защитными кольцами

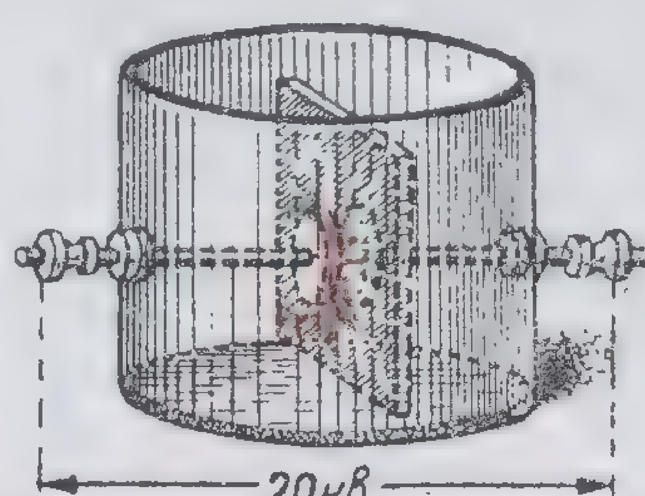


Разряд по гирлянде с защитными кольцами

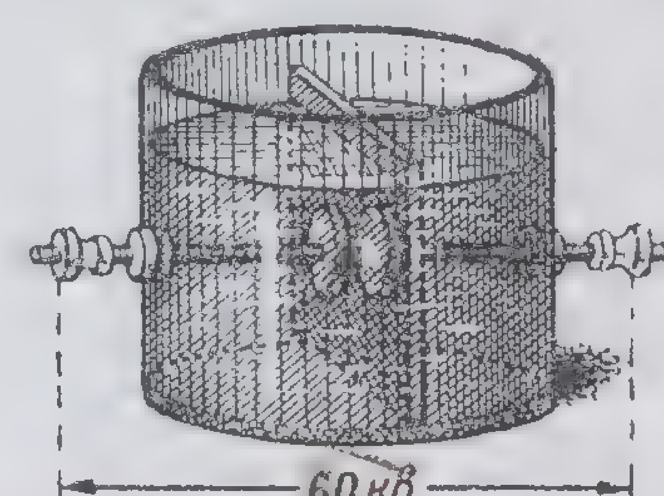
Электрической прочностью (пробивной напряженностью $E_{проб}$) диэлектрика называют напряженность электрического поля, при которой происходит пробой диэлектрика



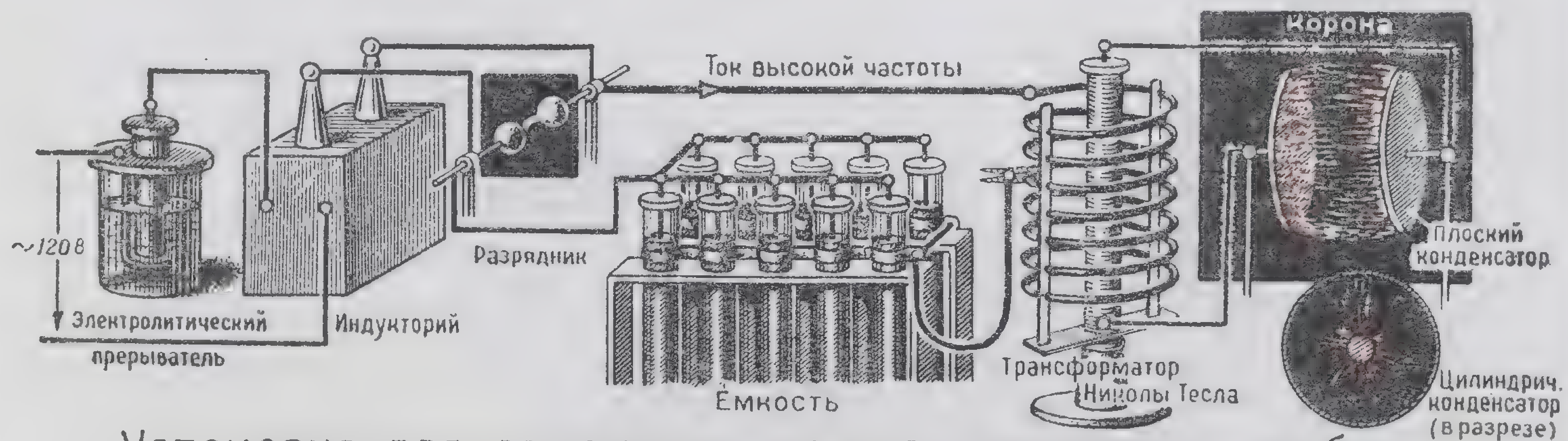
Пробой масла
($E_{проб}$=10 кв/мм)



Разряд по поверхности стеклянной пластинки в воздухе



Пробой стеклянной пластинки под маслом ($E_{проб}$=30 кв/мм)

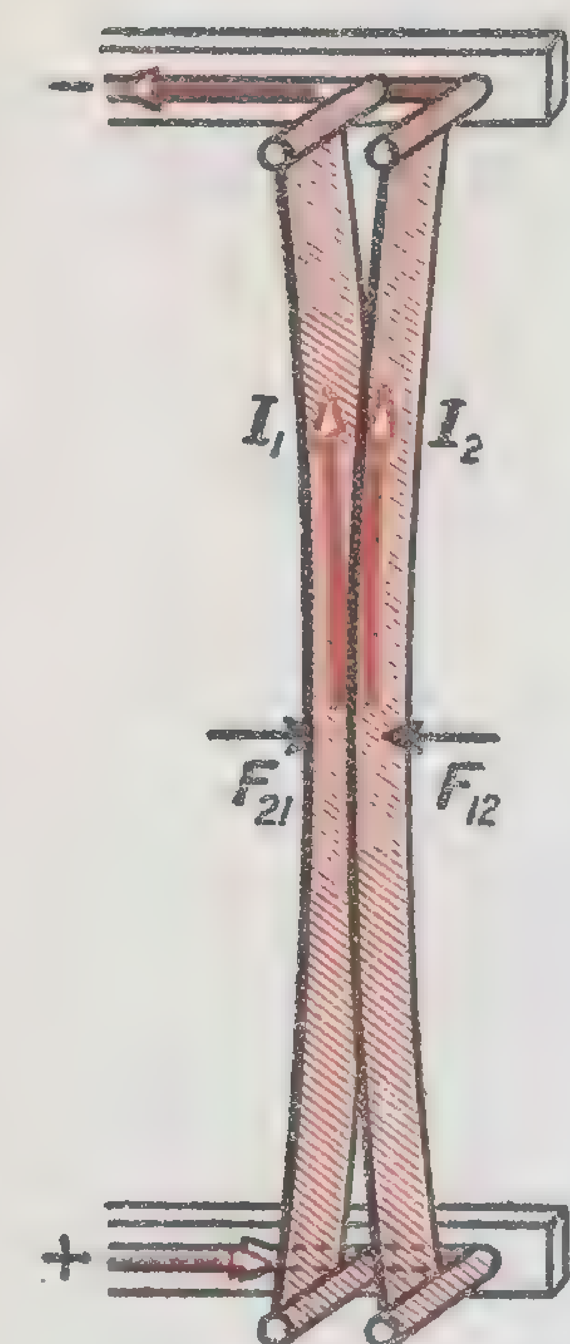


Установка для демонстрации электрического пробоя

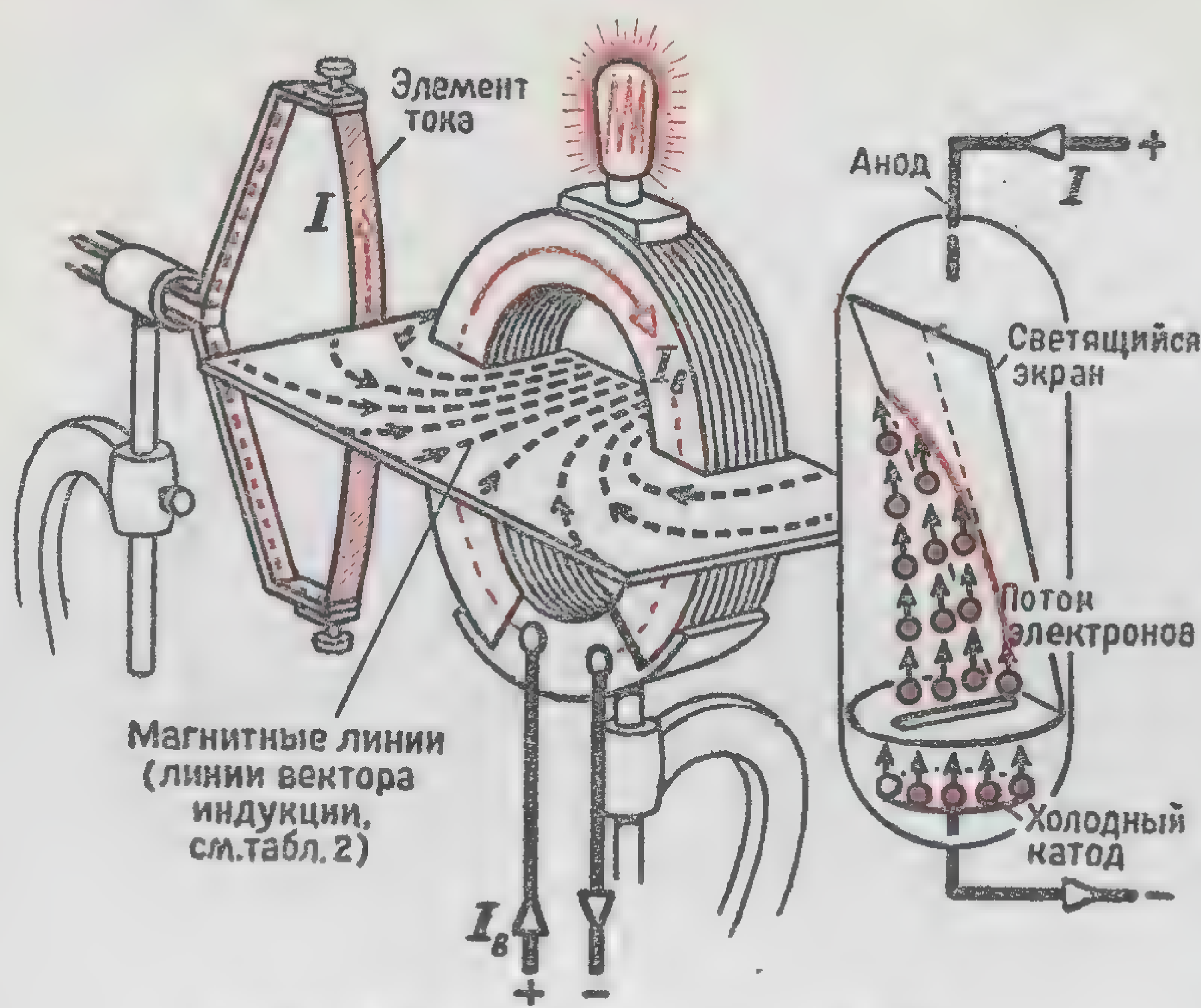
Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

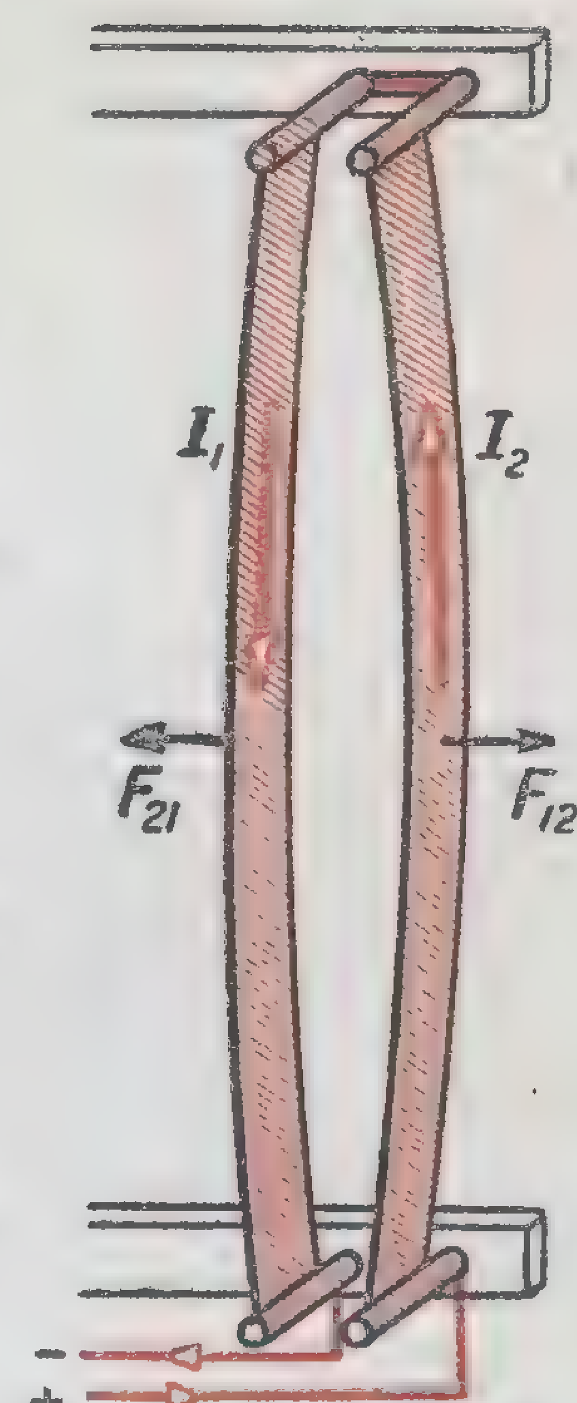
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
(притяжение)
одинаково направленных параллельных токов

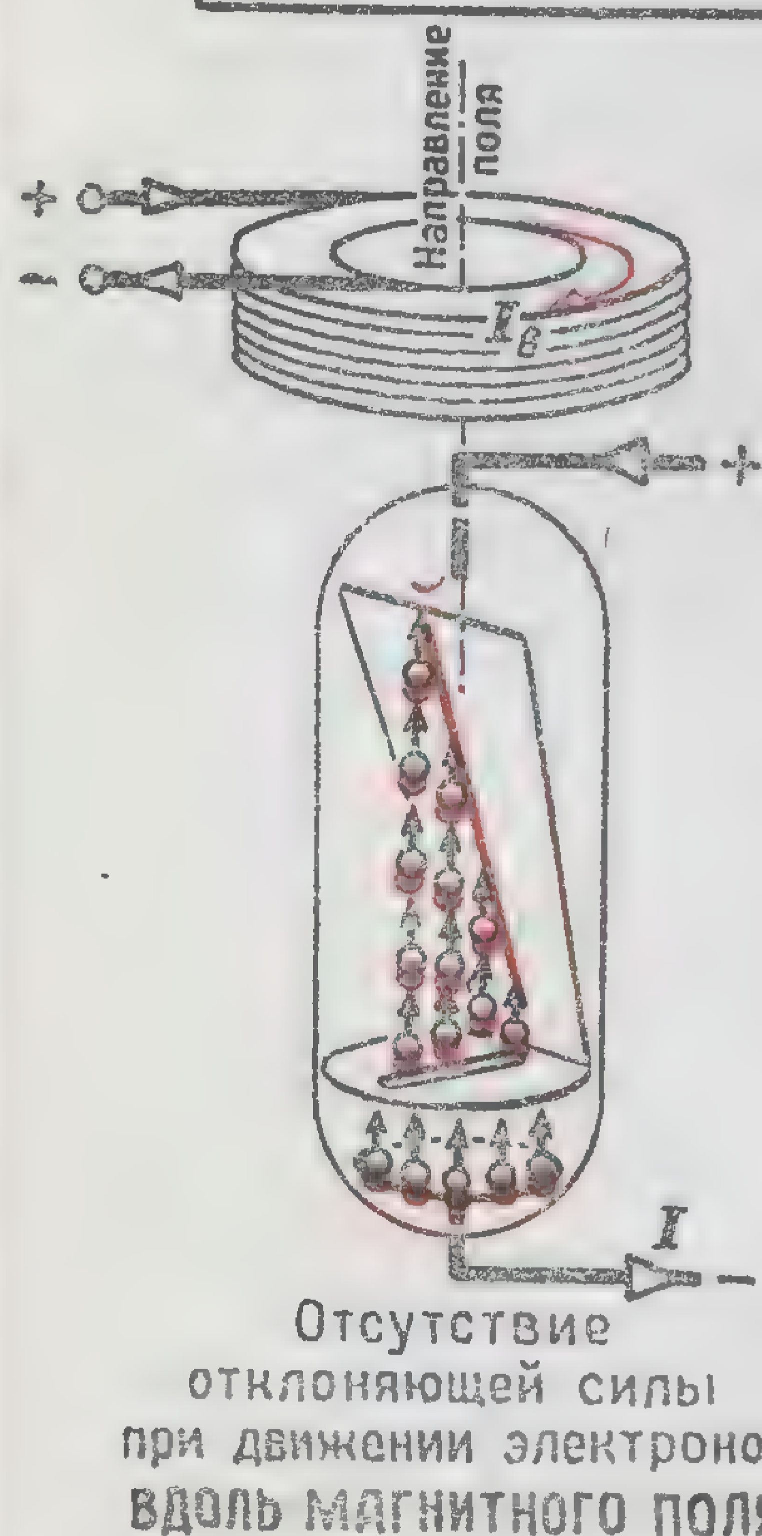


ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
катушки на элемент тока
и на поток электронов



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
(отталкивание)
противоположно направленных параллельных токов

МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ называется особая форма движения материи в некоторой области пространства, в каждой точке которого проявляются силы, действующие на движущиеся электрические заряды (электрические токи) в направлении, перпендикулярном к их движению

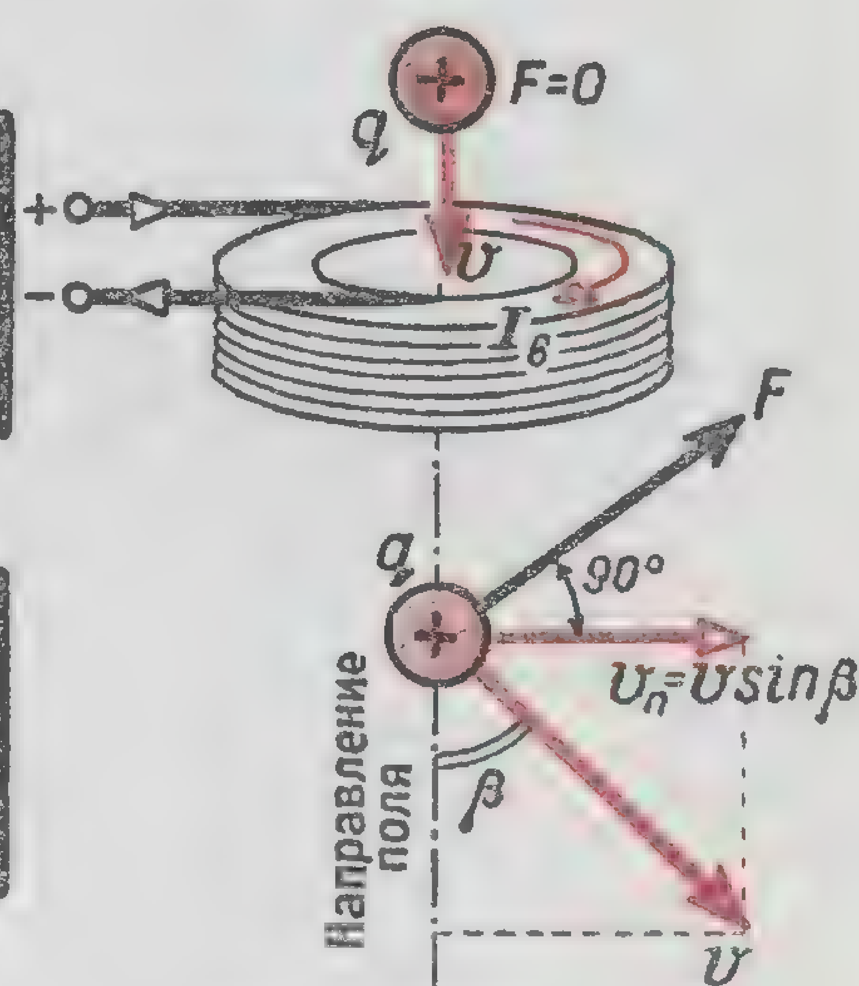


Отсутствие отклоняющей силы при движении электронов **ВДОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Направление, вдоль которого движущийся заряд (электрический ток) не испытывает воздействия со стороны поля, принимается за **НАПРАВЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

При движении пробного заряда под углом к направлению поля **отклоняющая сила перпендикулярна к скорости движения и к направлению поля**

Величина отклоняющей силы F пропорциональна произведению движущегося заряда q на проекцию v_n скорости движения в направлении, нормальном к полю



$$F = q \cdot v \sin\beta \quad н\left(\frac{дж}{м}\right)$$

Величина отклоняющей силы при движении пробного заряда **ПОД УГЛОМ β НАПРАВЛЕНИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

$$\frac{F}{q \cdot v_n} = пост \quad \frac{в \cdot сек}{м^2}$$

Для произвольной точки магнитного поля отношение отклоняющей силы к произведению пробного заряда на нормальную составляющую его скорости к полю является постоянной величиной и может служить мерой интенсивности магнитного поля

З.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

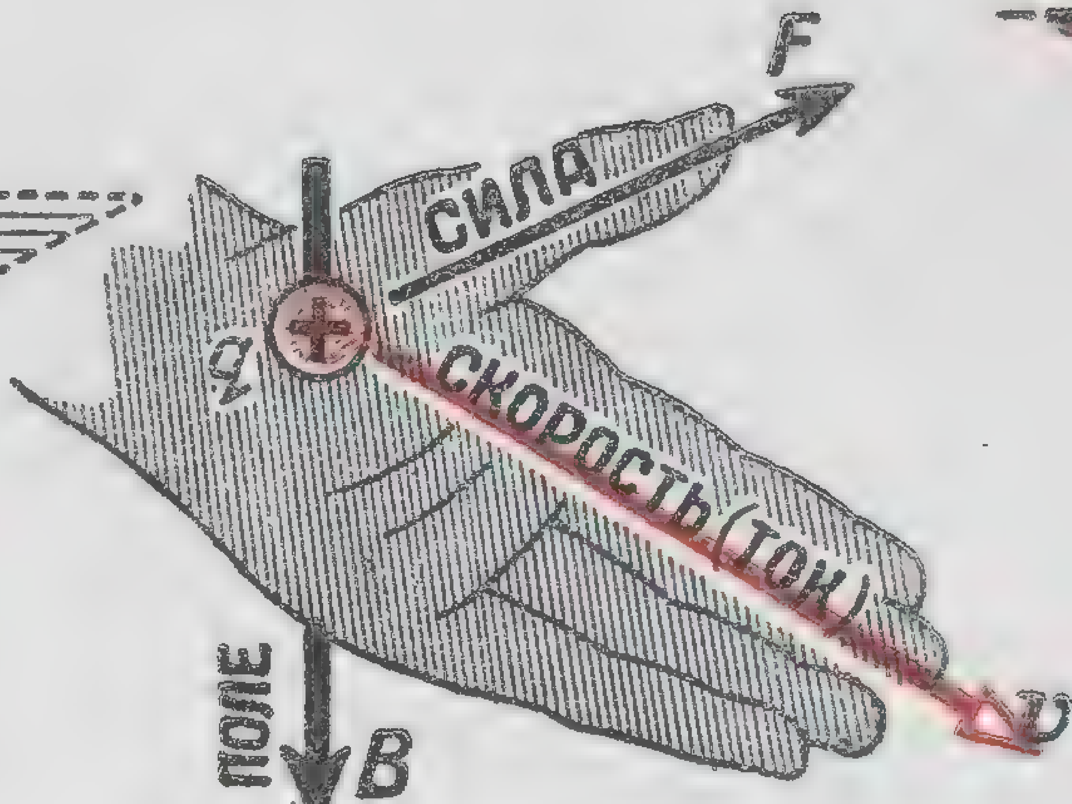
МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ



Движение пробного заряда под углом к магнитному полю

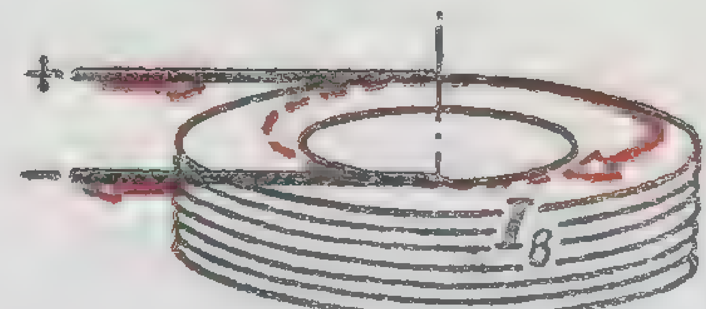
$$\frac{F}{q\cdot v\cdot \sin\beta}=\frac{F}{q\cdot v_n}=B \quad \frac{в\cdot сек}{м^2}$$

Магнитная индукция



Определение положительного направления магнитного поля по правилу левой руки

$$1\,\frac{в\cdot сек}{м^2}=10^4\,\frac{в\cdot сек}{см^2}=10^8\,гс$$



Движение пробного заряда нормально к магнитному полю

$$\bar{B}=\frac{[\bar{F}\cdot \bar{v}_n^0]}{q\cdot v_n} \quad \frac{в\cdot сек}{м^2}$$

Магнитная индукция (ВЕКТОР ИНДУКЦИИ)

Магнитная индукция есть основная физическая величина, характеризующая интенсивность магнитного поля в каждой его точке, **численно** равная отклоняющей силе, отнесенной к единице пробного заряда, движущегося с единичной скоростью в направлении, перпендикулярном к полю

• **Магнитная индукция** является направленной величиной (вектор), перпендикулярной к отклоняющей силе •

$$q\cdot\bar{v}=\rho V\cdot\bar{v}=\bar{\delta}V=\delta\cdot S\bar{l}=I\cdot\bar{l} \quad а\cdot м$$

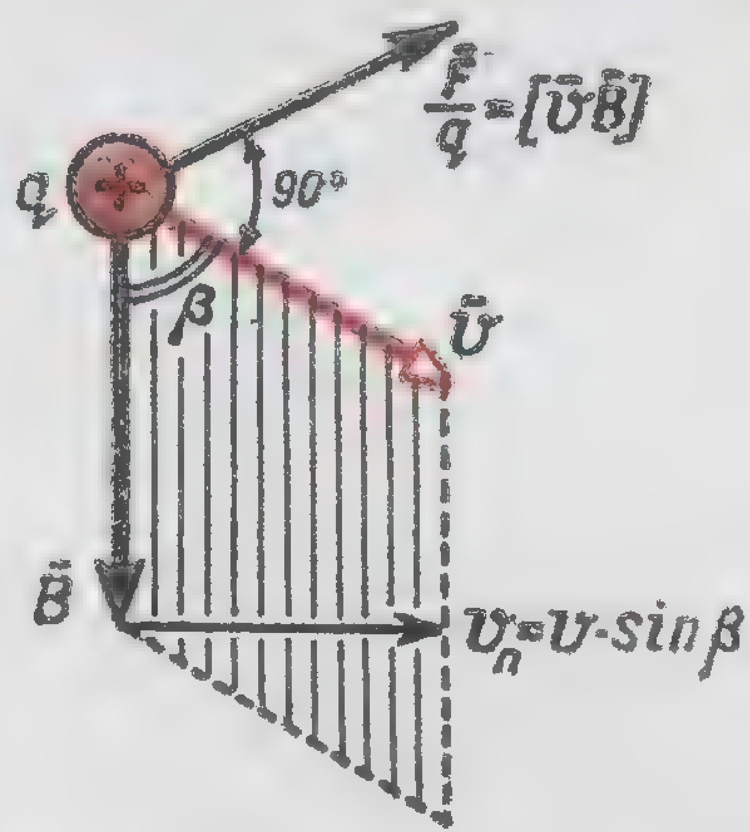
Движущийся пробный заряд эквивалентен элементу тока.
$\delta\cdot V$ — элемент объемного тока,
$I\cdot\bar{l}$ — элемент линейного тока

$$F=qvB\sin\beta=\delta VB\sin\beta=IlB\sin\beta$$

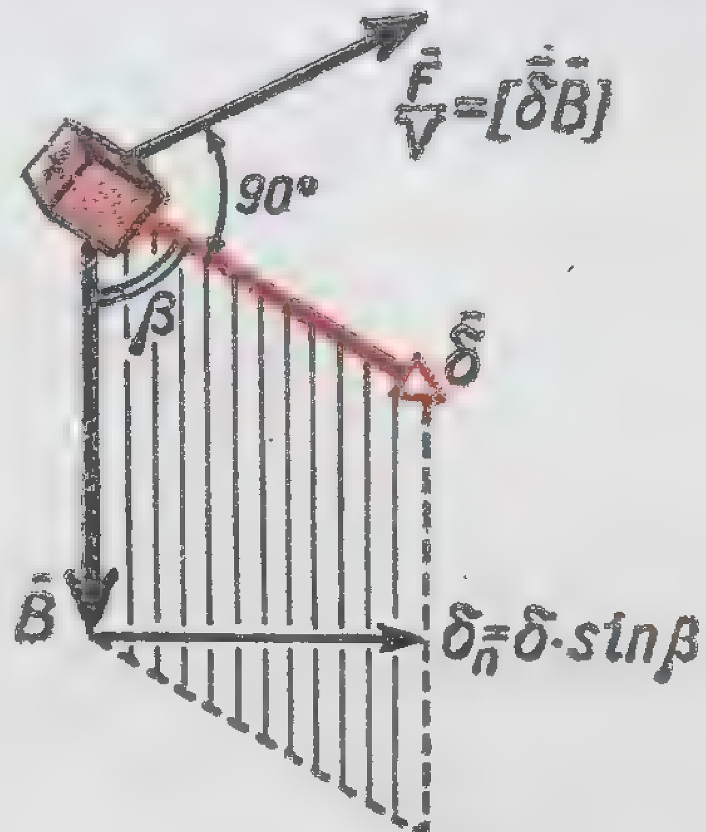
или в векторной форме

$$\bar{F}=q[\bar{v}\bar{B}]=V[\bar{\delta}\bar{B}]=I[\bar{l}\bar{B}] \quad н\left(\frac{дж}{м}\right)$$

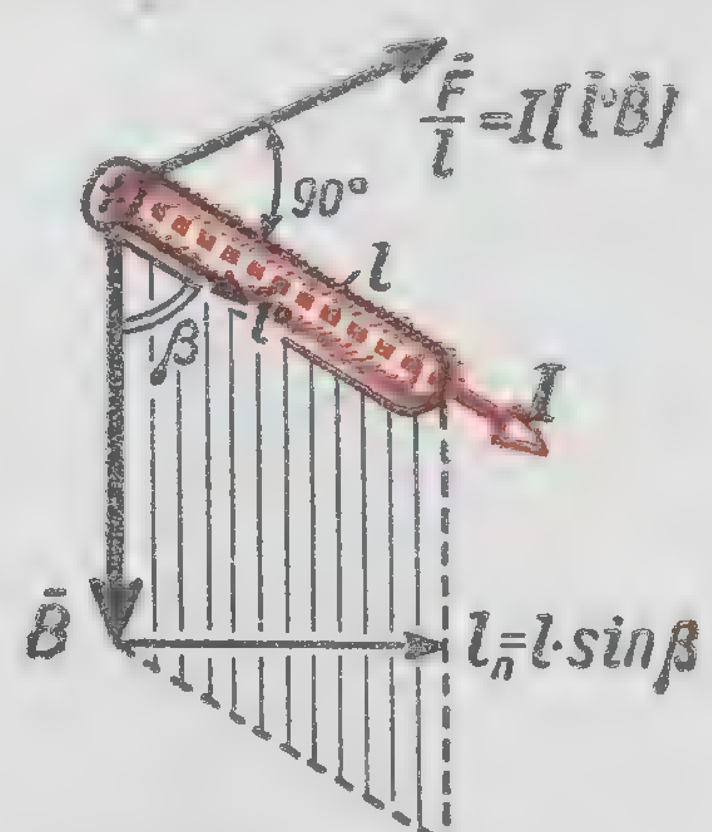
Величина отклоняющей силы



Отклоняющая сила, отнесенная к единице движущегося заряда (сравни табл. 19)



Отклоняющая сила, отнесенная к единице объема проводника с током



Отклоняющая сила, отнесенная к единице длины проводника с током (сравни табл. 3)

$B=1\,\frac{в\cdot сек}{м^2};\ v_n=30000\,\frac{км}{сек}=3\cdot10^7\,\frac{м}{сек}$
$F/q=v_nB=30\cdot10^6\,\frac{в}{м}=300\,\frac{кв}{см}$

Пример

$B=1{,}2\,\frac{в\cdot сек}{м^2};\ \delta=5\,\frac{а}{мм^2}=5\cdot10^6\,\frac{а}{м^2}$
$F/V=\delta_nB=6\cdot10^6\,\frac{н}{м^3}=0{,}612\,\frac{кГ}{см^3}$

Пример

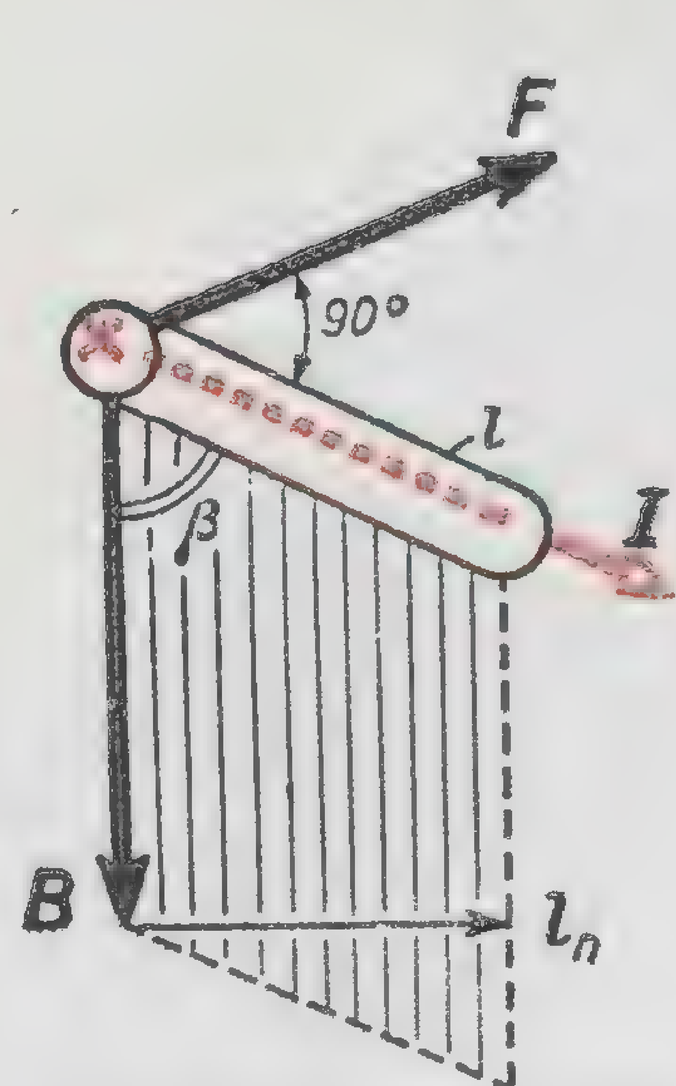
$B=1{,}5\,\frac{в\cdot сек}{м^2};\ I=50\,а$
$F/l_n=BI=75\,\frac{н}{м}=7{,}65\,\frac{кГ}{м}$

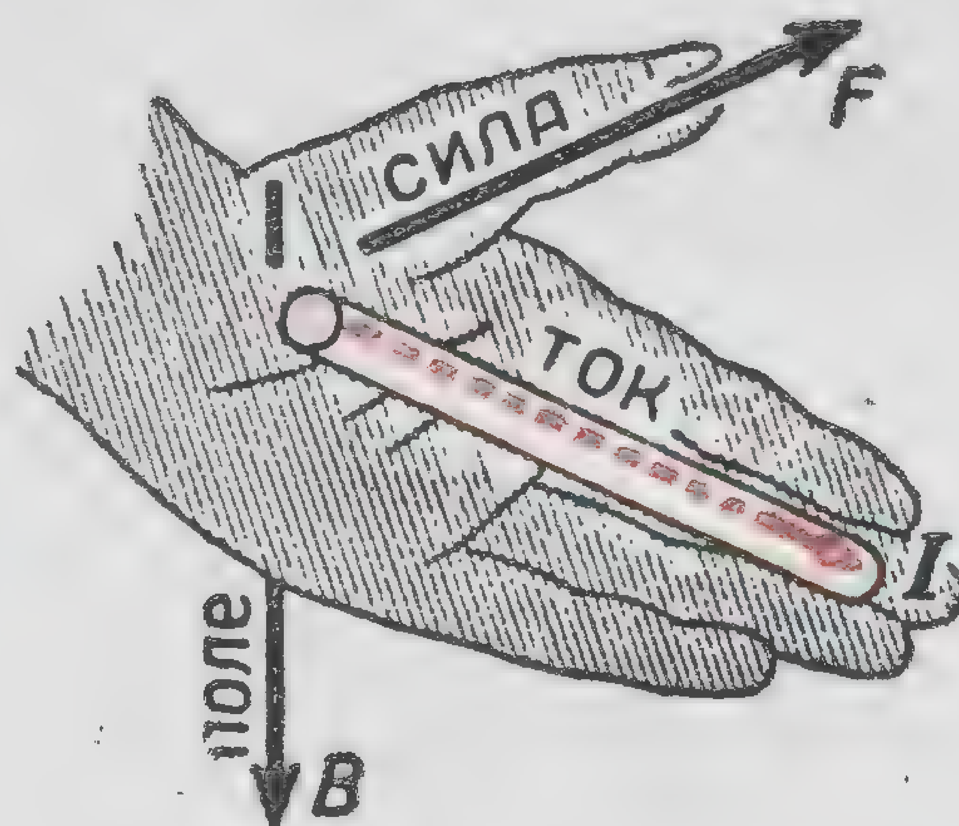
Пример

Э.И. Расовский

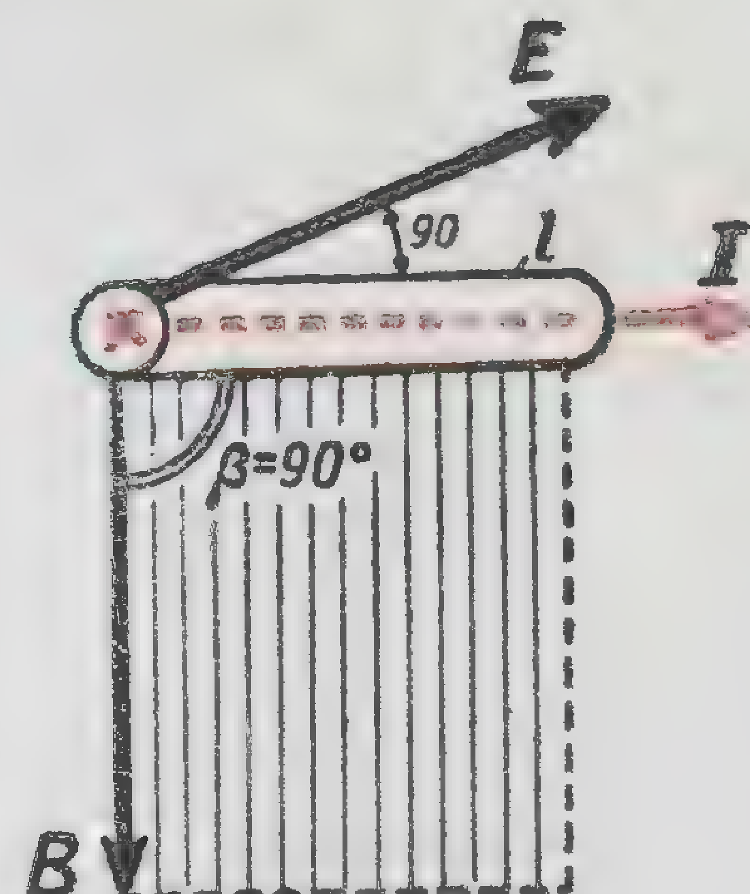
Худ. А. Меньшиков.

ПРАВИЛО ЛЕВОЙ РУКИ



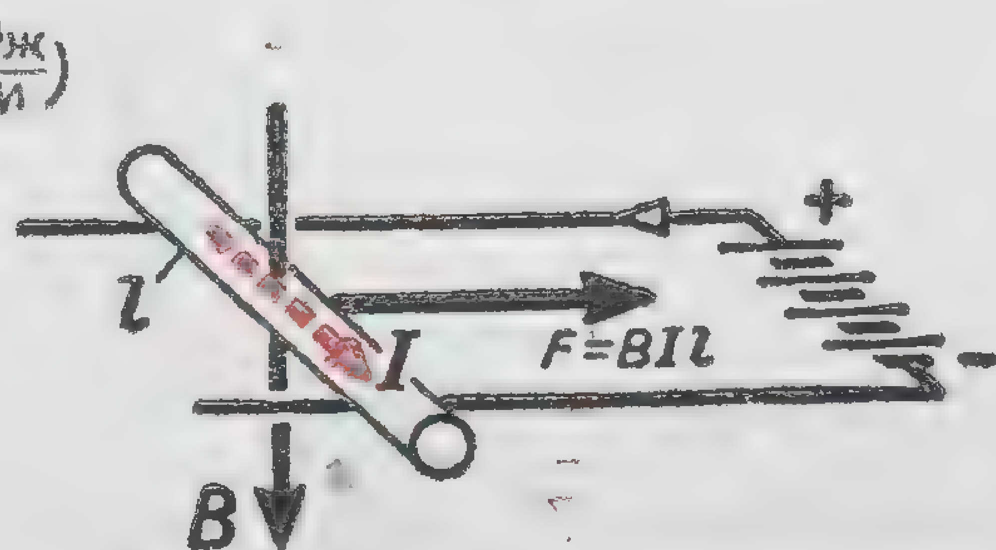


Определение направления
механической силы
по правилу
левой руки



$$F = BIl\sin\beta = BIl_n \quad H\left(\frac{дж}{м}\right)$$
$$\bar{F} = I\,[\bar{l}\,\bar{B}]$$

Механическая (электромагнитная) сила, действующая в магнитном поле на отрезок проводника с током ($\beta<90°$)



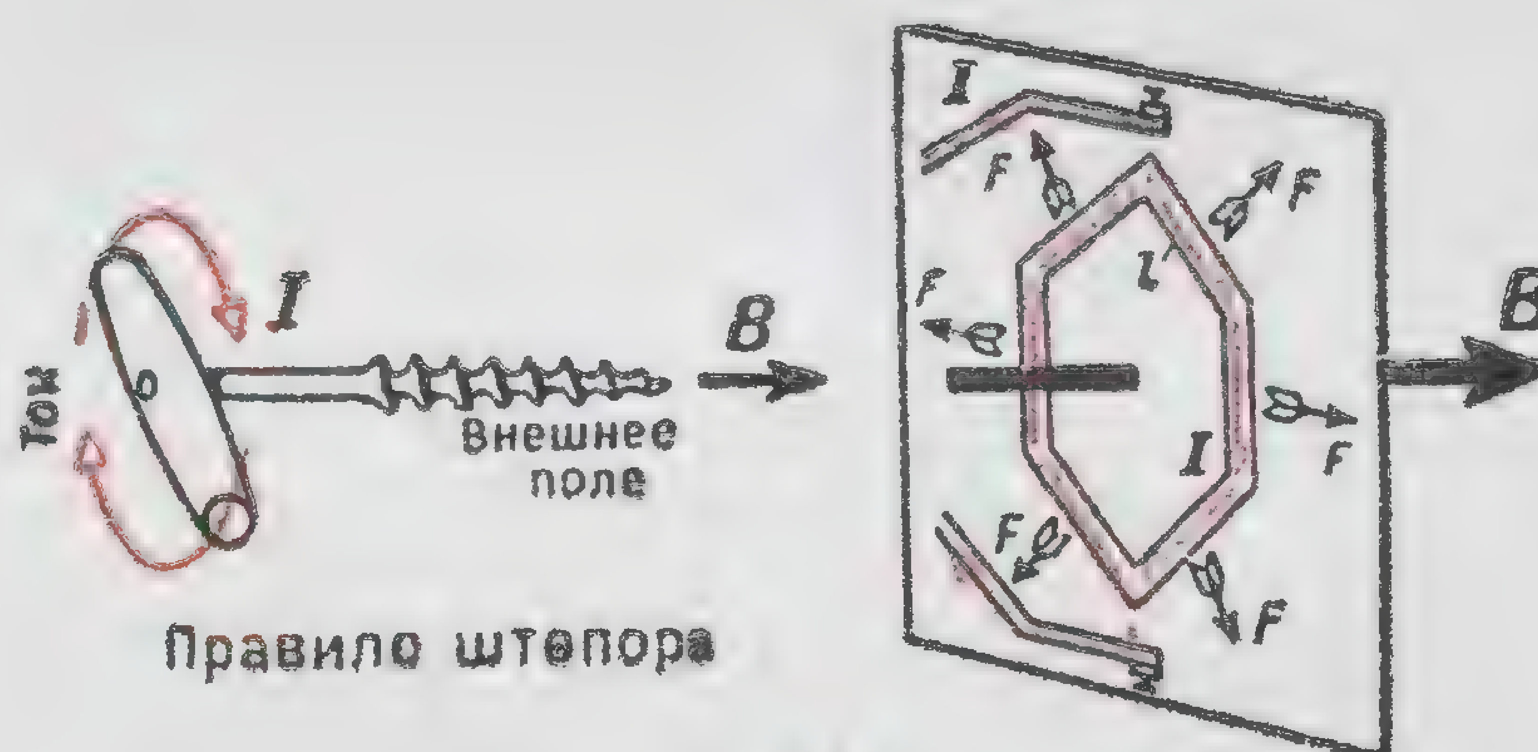
Сила, действующая на проводник с током

$$F = BIl \quad H\left(\frac{дж}{м}\right)$$

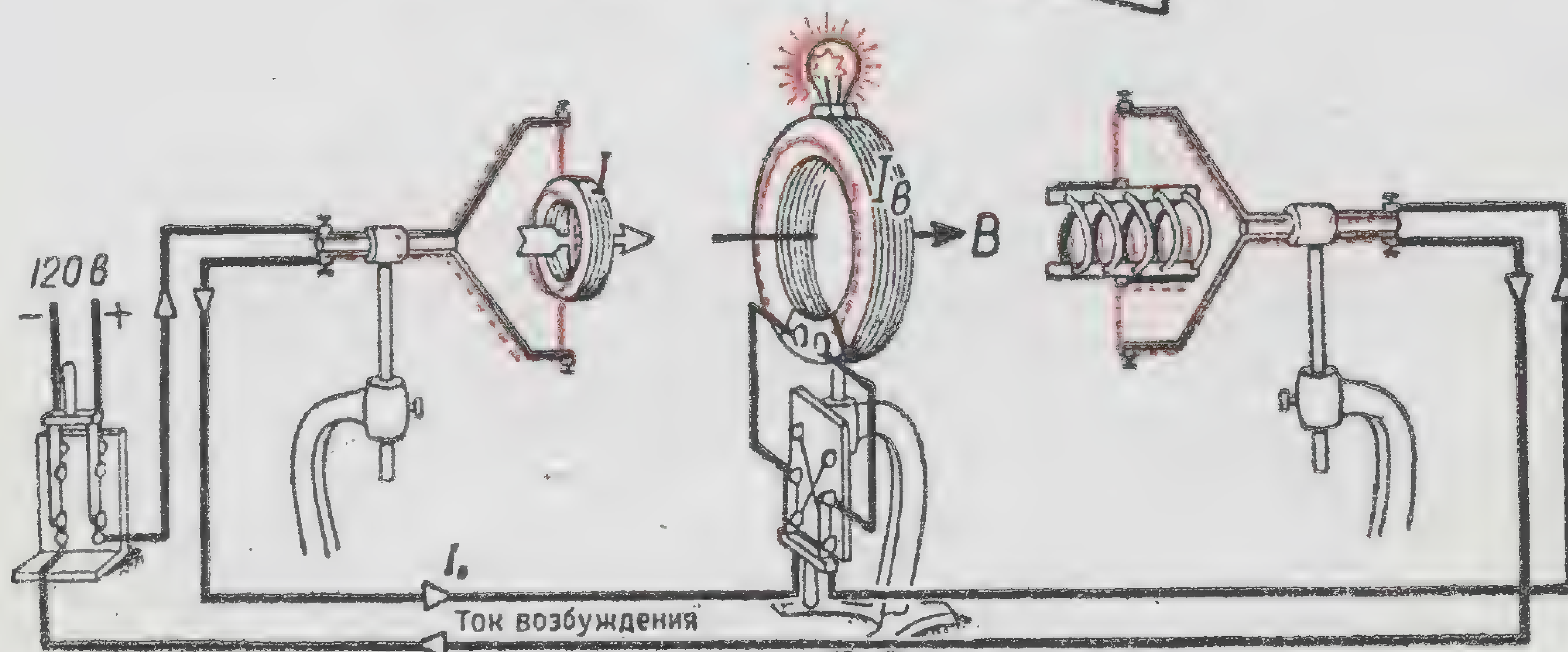
электромагнитная сила ($\beta=90°$)

$$B = 1{,}5\ \frac{в\cdot сек}{м^2};\ I = 50\,a;\ l = 0{,}4\,м$$
$$F = BIl = 30\,н = 3{,}06\,кГ$$

Пример



Правило штопора

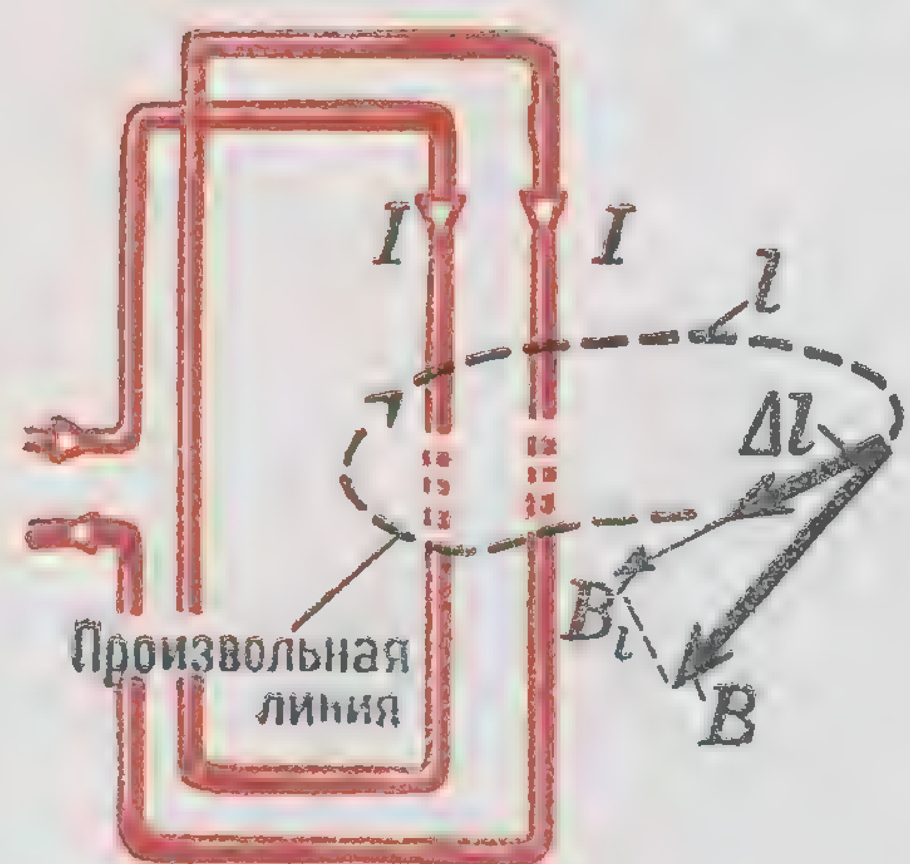


Ориентировка кругового тока I во внешнем магнитном поле
по **ПРАВИЛУ ШТОПОРА**

[illegible]

Худ. А. [illegible]

ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА

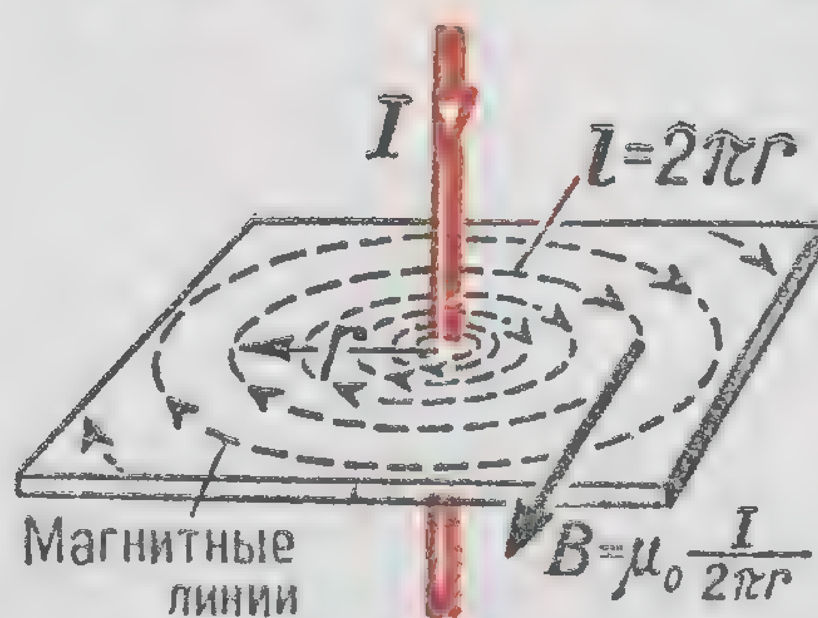


$\frac{1}{\mu_0}\Sigma_0 B_l \Delta l = \Sigma_0 I$ a

Закон полного тока для вакуума

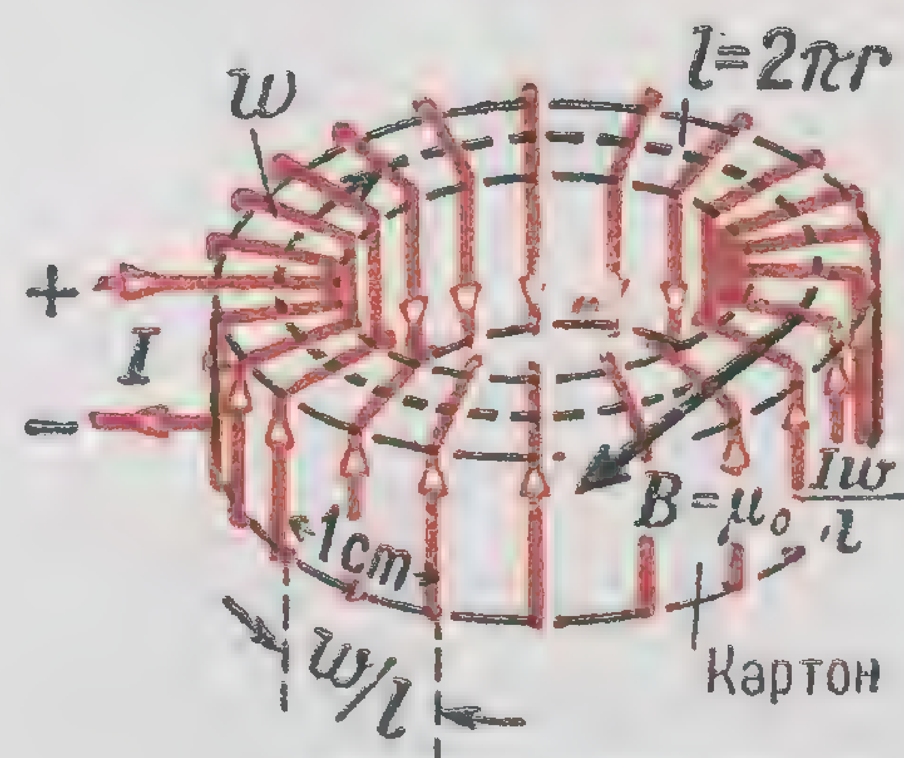
$\mu_0 = 0{,}4\pi \cdot 10^{-6}$ $\frac{в \cdot сек}{а \cdot м}$

Магнитная постоянная



$\frac{1}{\mu_0} Bl = I$ a

Магнитное поле прямолинейного тока



$\frac{1}{\mu_0} Bl = Iw$ a

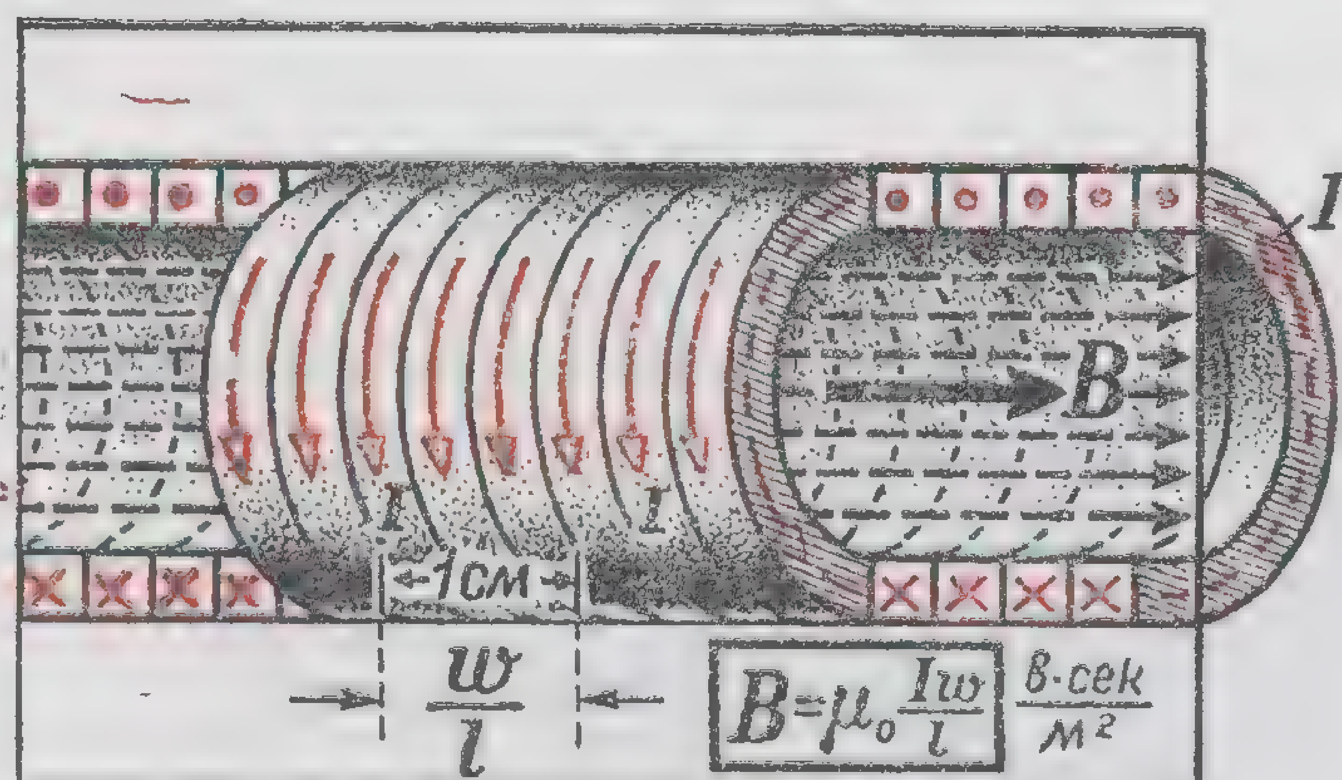
$I = 5a$; $w/l = 800 \frac{втк}{м} = 8 \frac{витков}{см}$

$\frac{B}{\mu_0} = \frac{Iw}{l} = 4000 \frac{а}{м} = 40 \frac{а}{см}$;

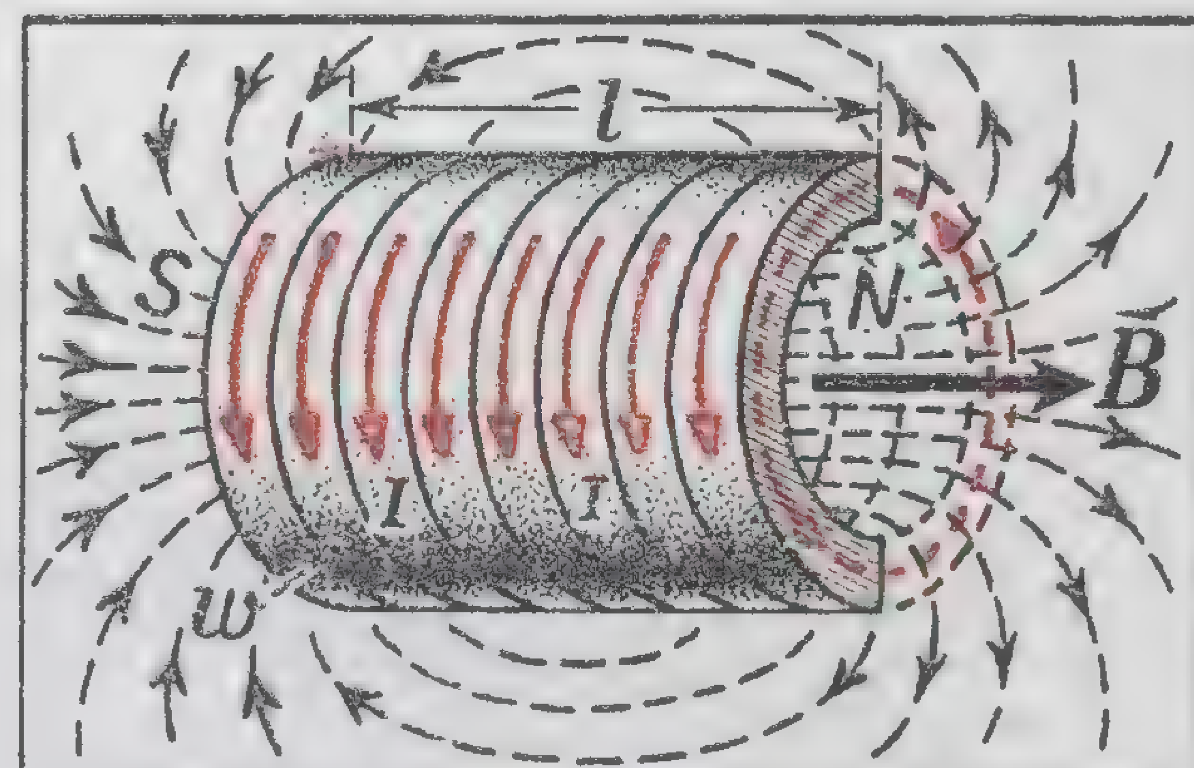
$B = 50 \cdot 10^{-4} \frac{в \cdot сек}{м^2} = 50 гс$

Пример

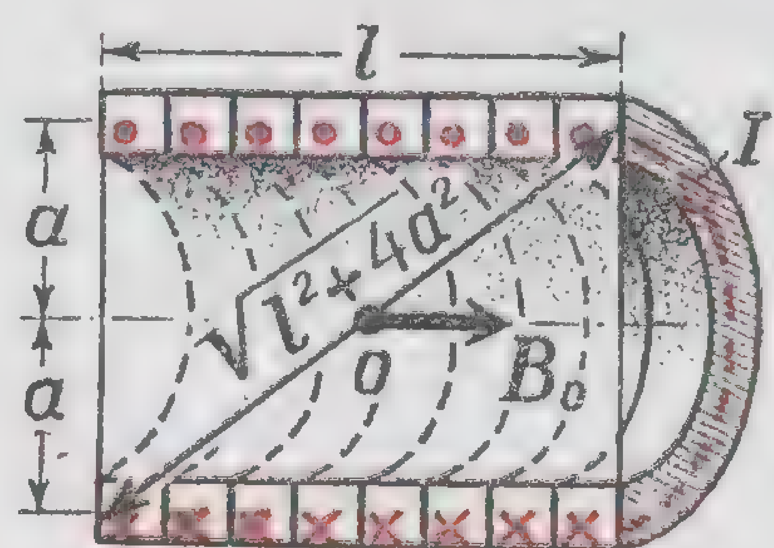
Магнитное поле кольцевой катушки (тороида)



Однородное магнитное поле бесконечно длинной катушки

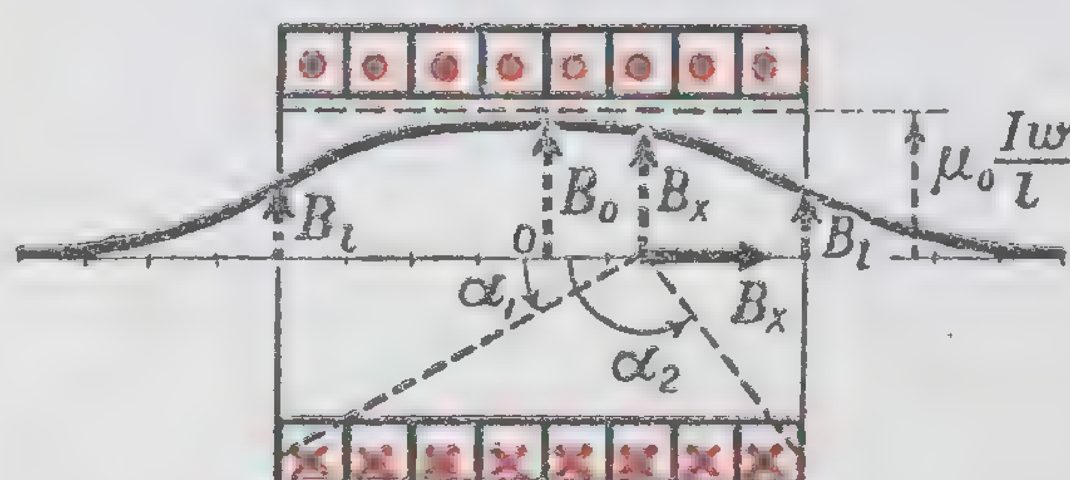


Магнитное поле прямой катушки (соленоида)



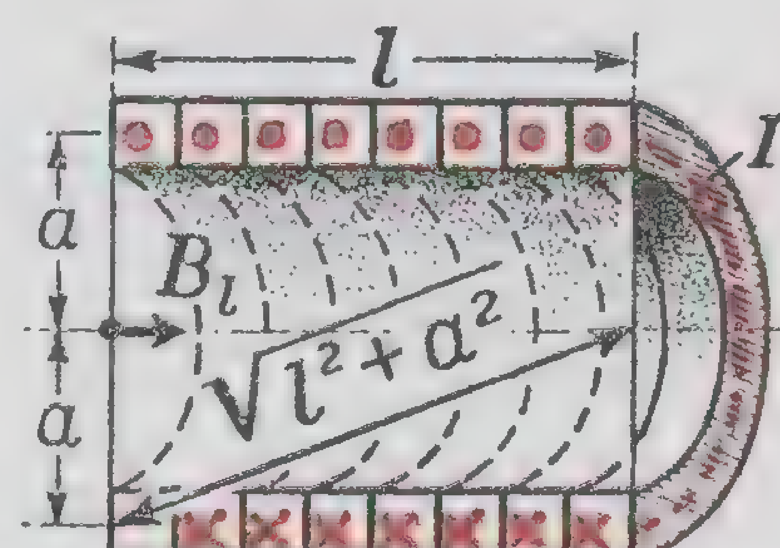
$B_0 = \mu_0 \frac{Iw}{\sqrt{l^2+4a^2}}$ $\frac{в \cdot сек}{м^2}$

Магнитная индукция в центре катушки



$B_x = \mu_0 \frac{Iw}{l} \frac{\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2}{2}$ $\frac{в \cdot сек}{м^2}$

Магнитная индукция на оси катушки



$B_l = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{Iw}{\sqrt{l^2+a^2}}$ $\frac{в \cdot сек}{м^2}$

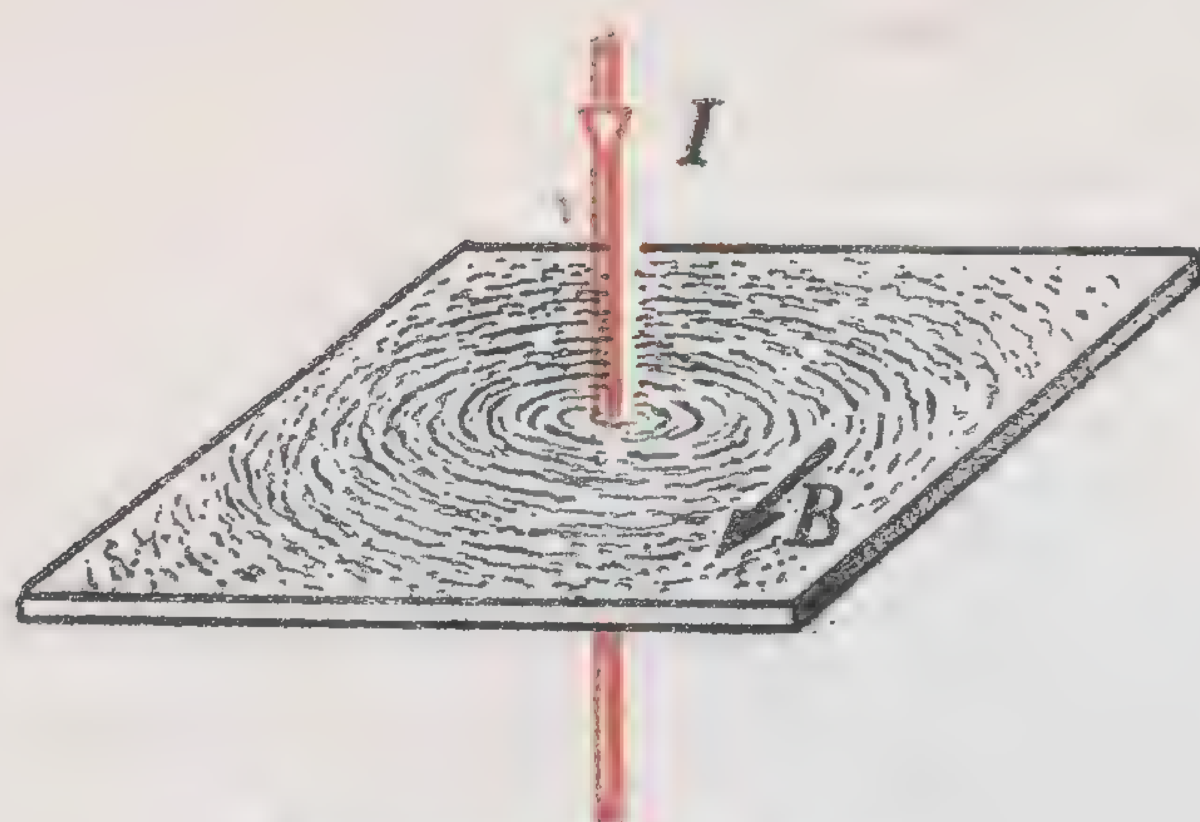
Магнитная индукция у края катушки

Линейная сумма вектора индукции вдоль произвольного замкнутого контура пропорциональна полному току (ампервиткам), охватываемому этим контуром

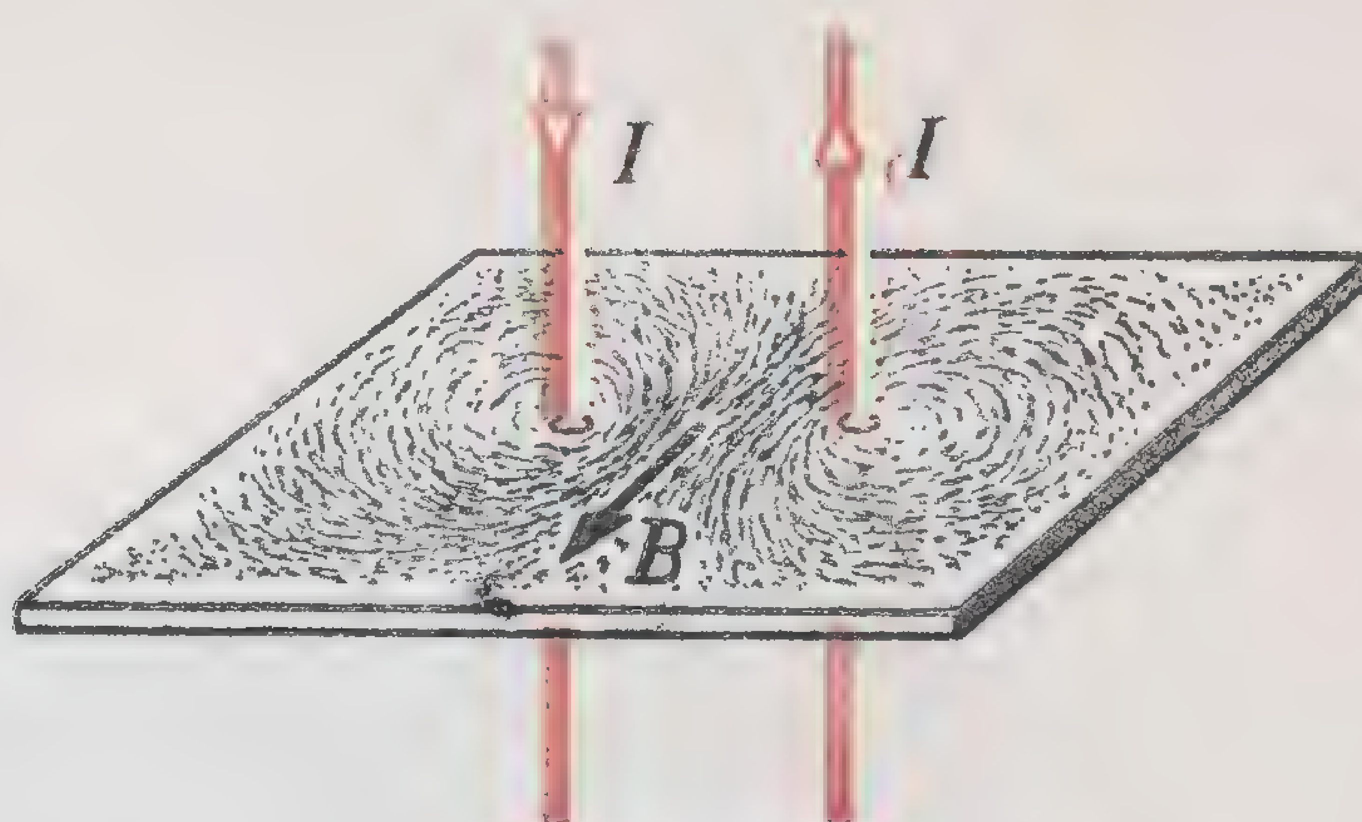
Закон полного тока для вакуума

Э. И. Расовский.

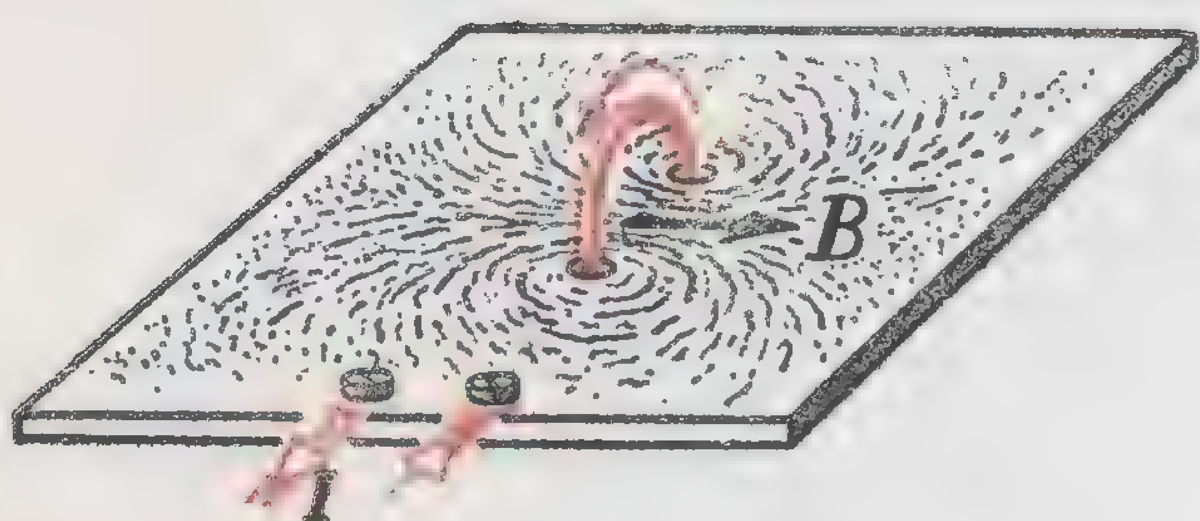
ПРАВИЛО ШТОПОРА



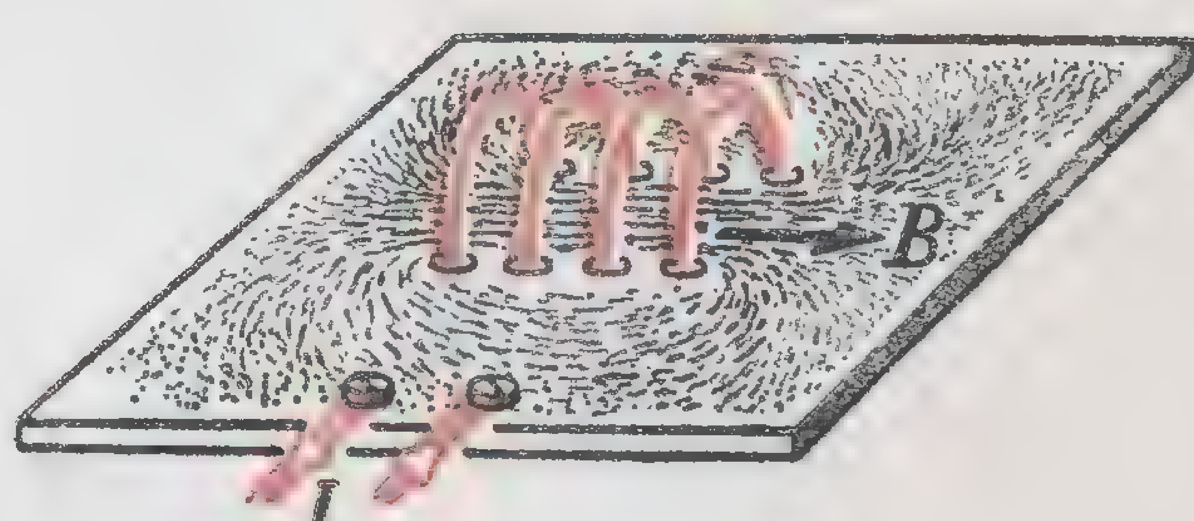
Прямолинейный ток



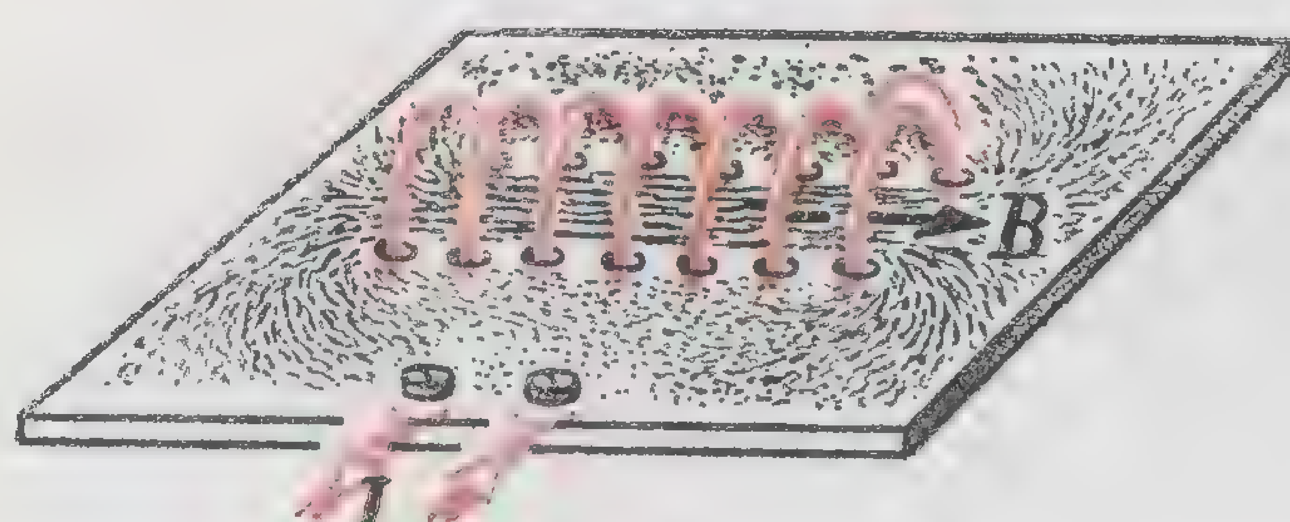
Параллельные токи



Виток с током



Короткая катушка

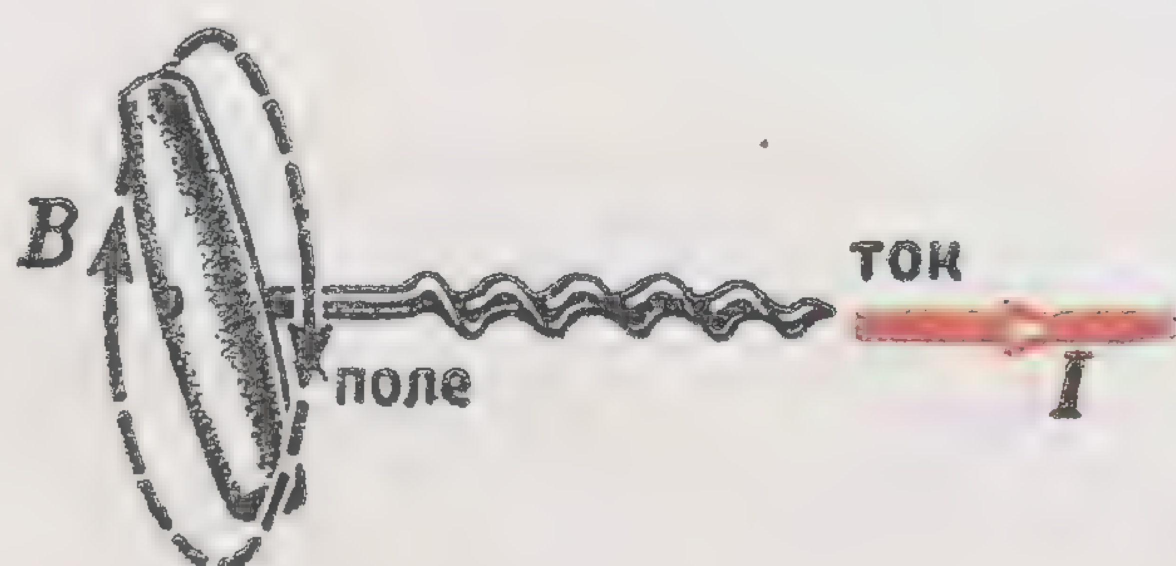


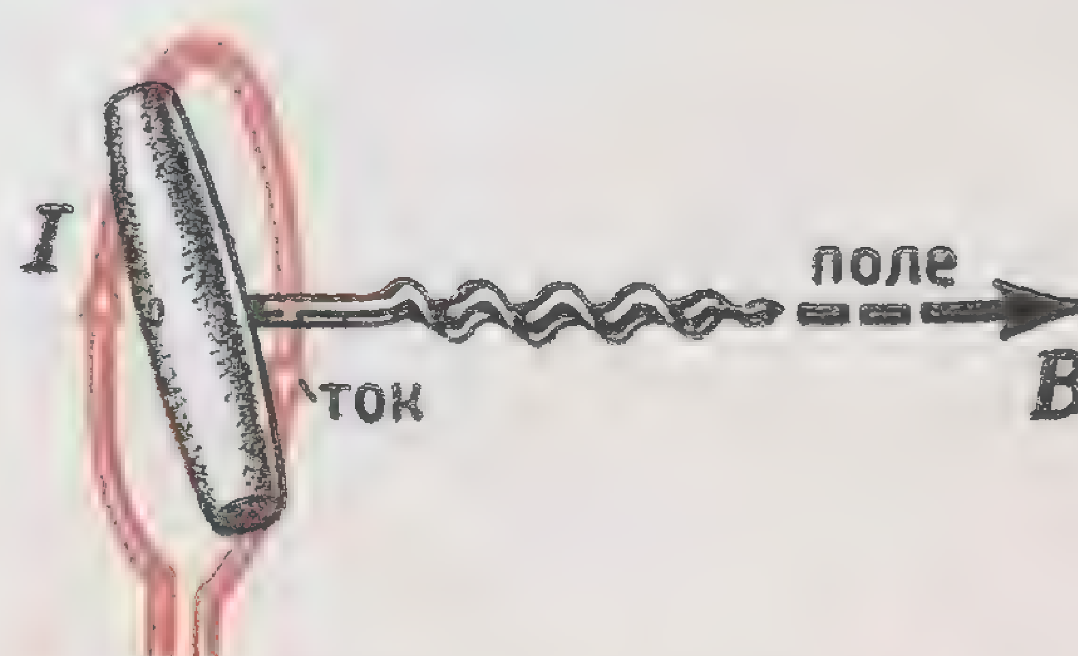
Длинная катушка



Кольцевая катушка

Магнитные спектры





Взаимное направление тока и его магнитного поля связано **правилом штопора**

Э. И. Расовский

МАГНИТНЫЙ ПОТОК

$$\Phi = \bar{B}\bar{S} = B_n S = B S_n \quad \text{в·сек}$$

Магнитный поток (поток вектора индукции)

1 в·сек = 10^8 мкс

Магнитный поток через поверхность

$$B = \frac{\Phi}{S_n} \quad \frac{\text{в·сек}}{\text{м}^2}$$

Магнитная индукция — мера плотности магнитного потока

$$\Phi_{тр} = B_1 S_1 = B_2 S_2 = const \quad \text{в·сек}$$

Поток магнитной трубки постоянен

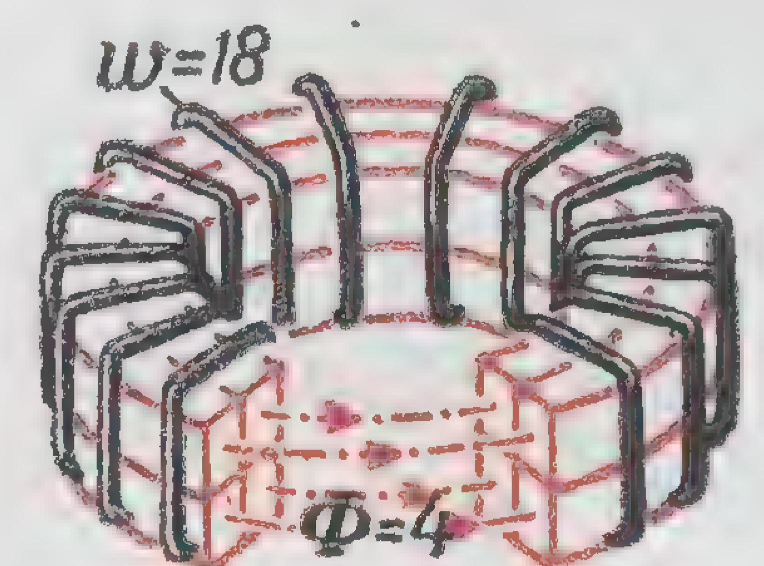
Магнитная трубка постоянного сечения

Магнитные трубки в поле двухпроводной линии

Магнитные линии (оси трубок)

$\Phi = 4$

Магнитный поток измеряется числом единичных трубок (линий) индукции

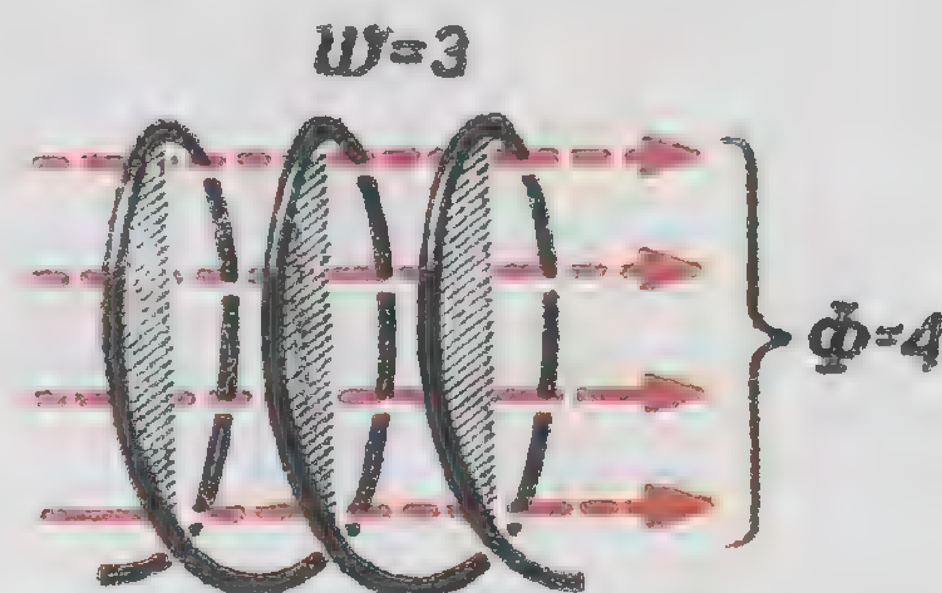


$$\Psi = \Sigma w \Phi = w\Phi = 18 \cdot 4 = 72$$

Потокосцепление тороида

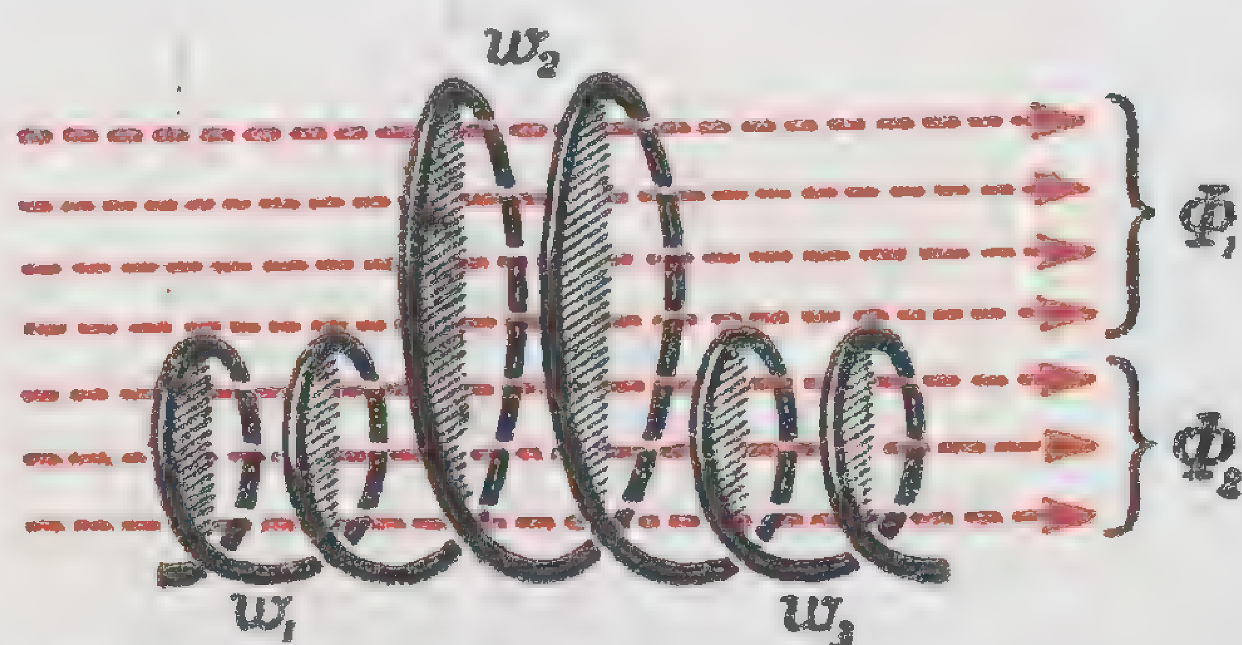
$$\Psi = \Sigma w \Phi \quad \text{в·сек}$$

Потокосцепление обмотки



$$\Psi = \Sigma w \Phi = w\Phi = 3 \cdot 4 = 12$$

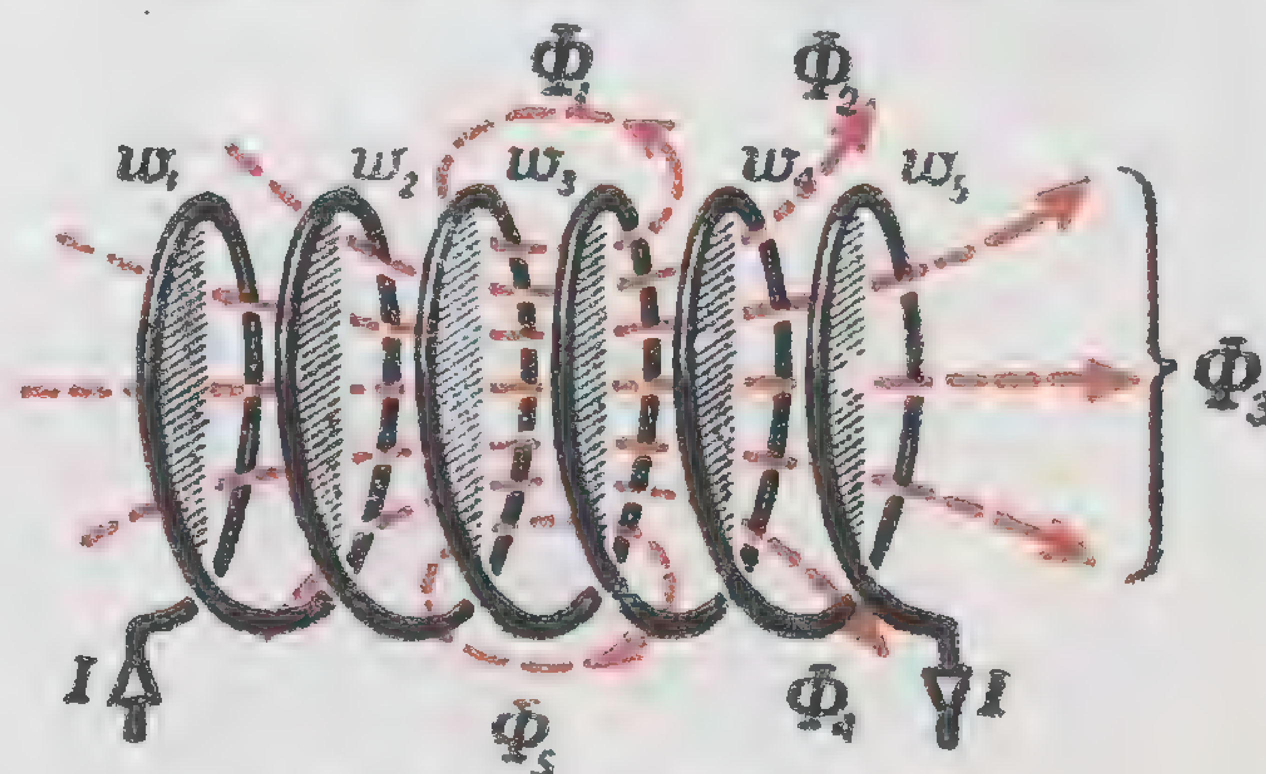
Потокосцепление прямой катушки



$$\Psi = \Sigma w_k \Phi_{wk} = w_1\Phi_2 + w_2(\Phi_1 + \Phi_2) + w_3\Phi_2 = 2\cdot3 + 2\cdot7 + 2\cdot3 = 26$$

или $\Psi = \Sigma \Phi_k w_{\Phi k} = \Phi_1 w_2 + \Phi_2 (w_1 + w_2 + w_3) = 4\cdot2 + 3\cdot6 = 26$

Потокосцепление Фасонной катушки, расположенной во внешнем магнитном поле



$$\Psi = \Sigma w_k \Phi_{wk} = 3 + 5 + 2\cdot7 + 5 + 3 = 30$$

или $\Psi = \Sigma \Phi_k w_{\Phi k} = 2 + 4 + 3\cdot6 + 4 + 2 = 30$

Потокосцепление катушки обтекаемой током

Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ФЕРРОМАГНЕТИЗМ



Вращение электрона вокруг ядра атома



Вращение электрона вокруг своей оси (спин)

Молекулярный круговой ток

Ферромагнетизм обусловлен спином электронов

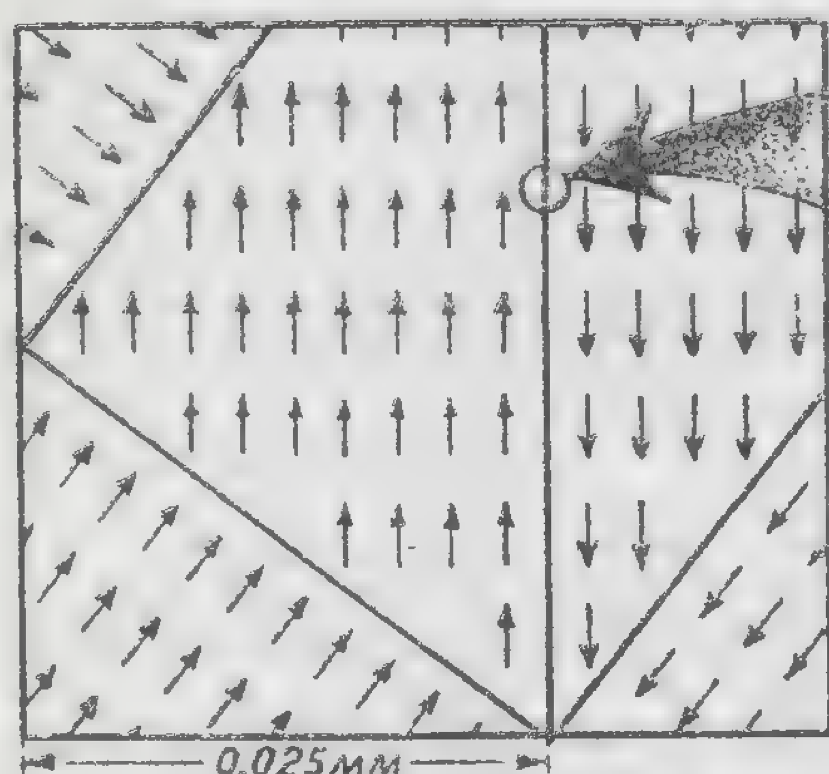
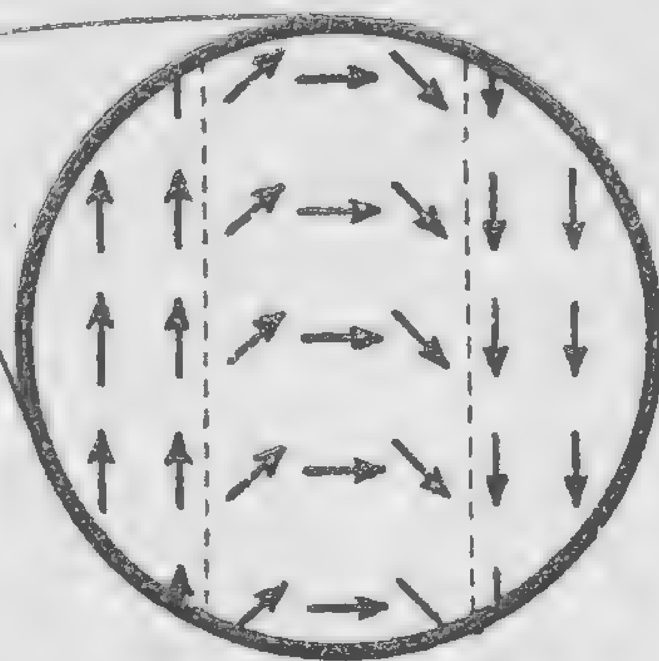
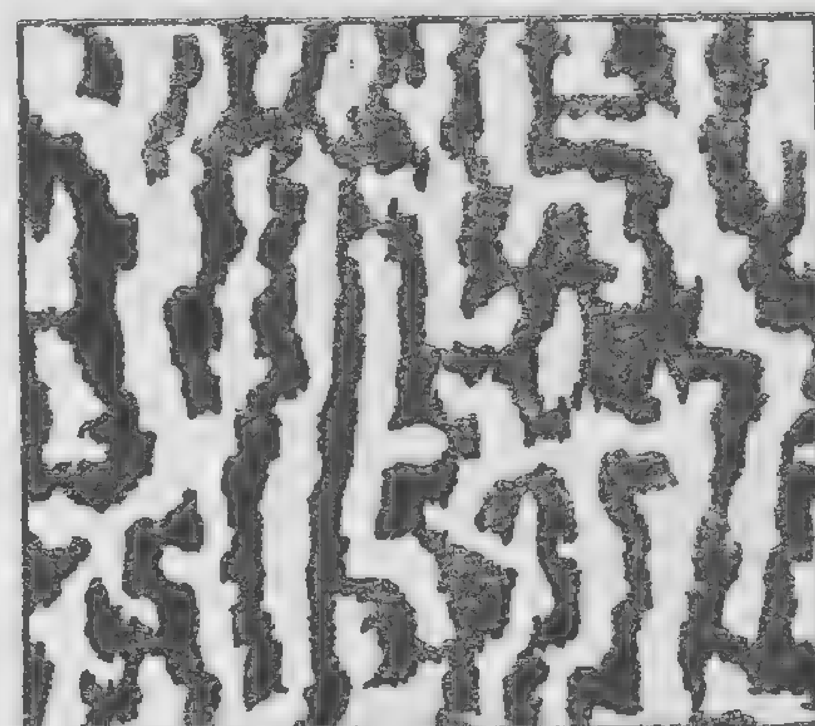


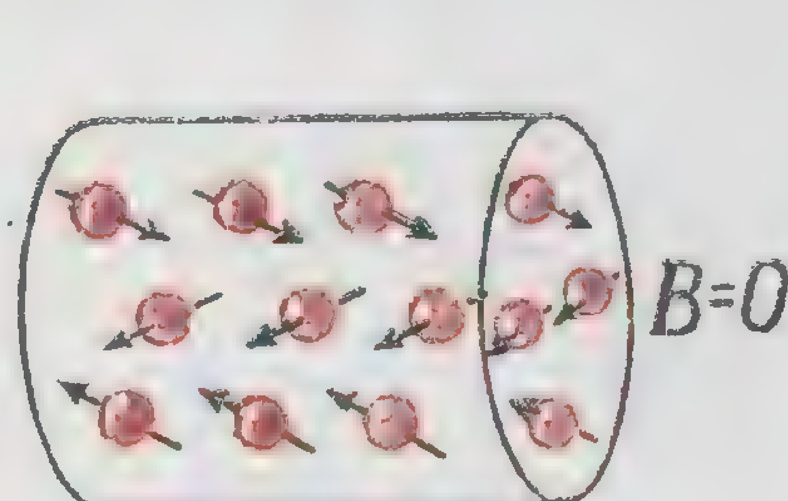
Схема одинаковой ориентировки спинов в областях самопроизвольного (спонтанного) намагничения ферромагнитного тела



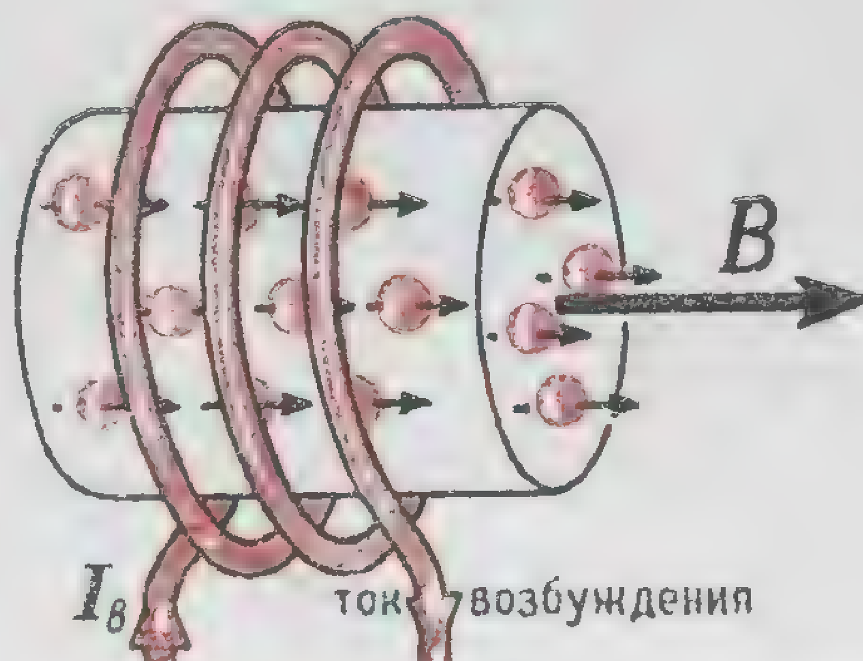
Граница между двумя областями самопроизвольного намагничения



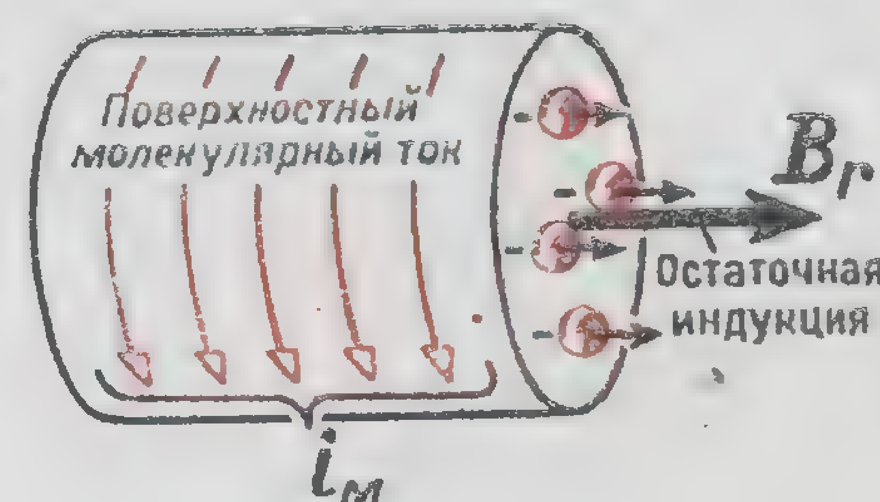
Области самопроизвольного намагничения (фигуры, получающиеся при осаждении ферромагнитного порошка на поверхности шлифованной стали по методу И.С.Акулова и М.В.Дехтяр)



Беспорядочное направление молекулярных токов в ненамагниченном стержне

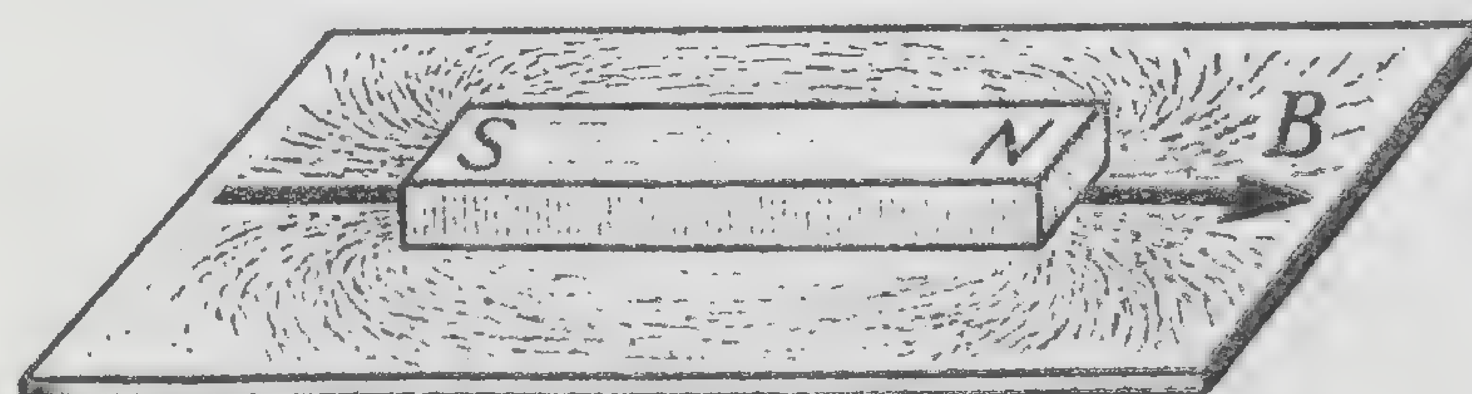


Ориентировка молекулярных токов во внешнем магнитном поле



Намагниченный стержень

Упрощенная модель ферромагнитного тела



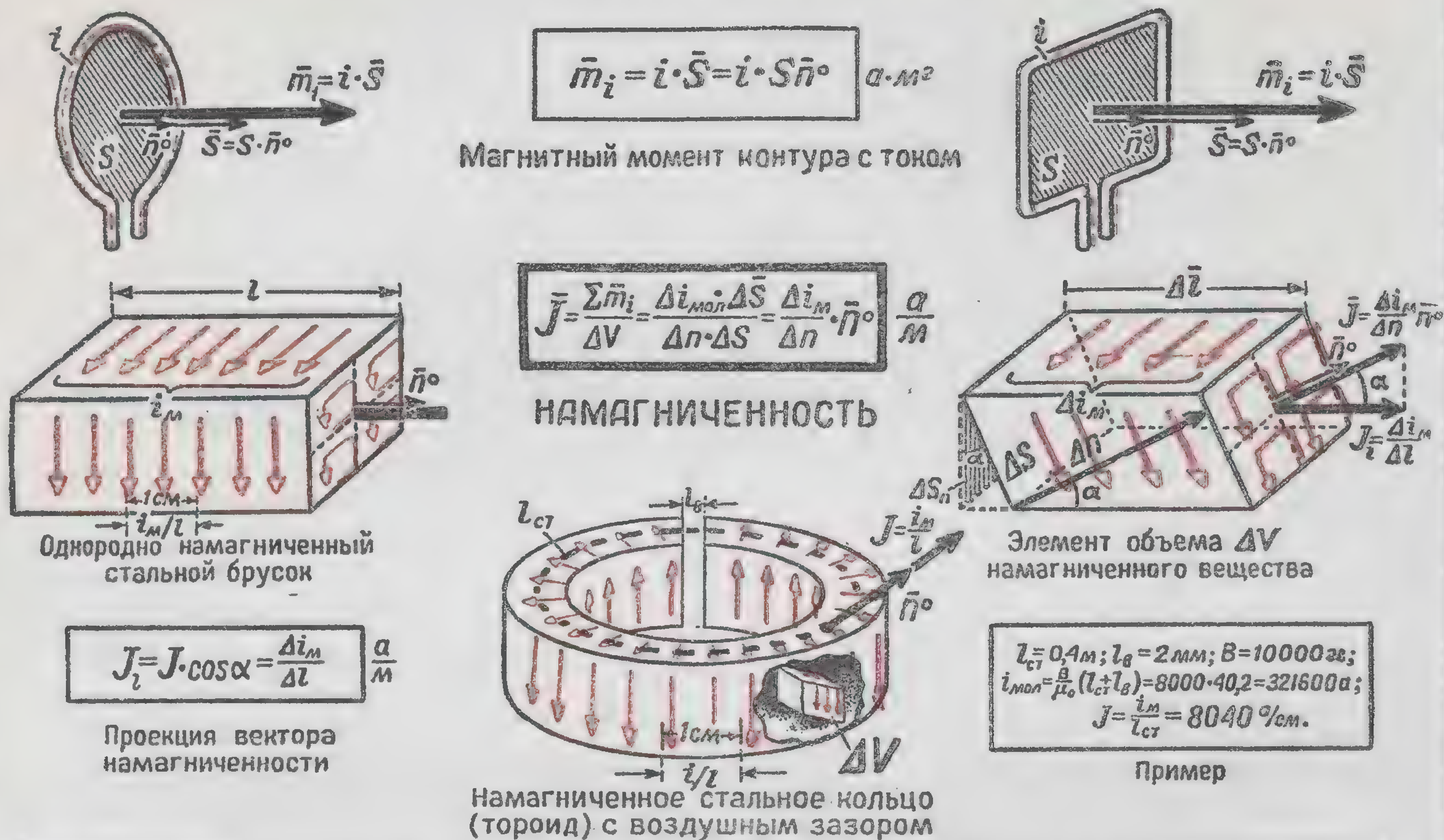
Спектр прямого магнита

Первое исследование процесса намагничения стали произведено А.Г.Столетовым (1872 г.). Выдающаяся роль в области теоретических и практических исследований ферромагнетизма принадлежит советским ученым В.К.Аркадьеву, Н.С.Акулову и др.

Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

НАМАГНИЧЕННОСТЬ



НАМАГНИЧЕННОСТЬ (вектор намагниченности) есть физическая величина, характеризующая в произвольной точке вещества степень согласованной ориентировки молекулярных токов, и представляет собою геометрическую сумму магнитных моментов молекулярных токов, отнесенную к единице объема вещества

НАМАГНИЧЕННОСТЬ измеряется поверхностным молекулярным током, отнесенным к единице длины в направлении согласованной ориентировки молекулярных токов

$$\Sigma_0 \bar{J} \cdot \Delta \bar{l} = \Sigma_0 J_l \cdot \Delta l = \Sigma i_{мол} \quad а$$

Линейная сумма вектора намагниченности вдоль произвольного замкнутого контура равна молекулярному току, охватываемому этим контуром



$B = B_{ст} = B_в = 1.5 \frac{в \cdot сек}{м^2} = 15000 гс$; $\frac{B}{\mu_0} = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 1,5 = 1,2 \cdot 10^6 \frac{а}{м} = 12000 \frac{а}{см}$; $l_{ст} = 0,4 м$; $l_в = 2 мм$; $Iw = 3400 а$;
$i_{мол} = \frac{B}{\mu_0}(l_{ст} + l_в) - Iw = 479000 а$; $J_{ст} = \frac{i_м}{l_{ст}} = 11975 \frac{а}{см}$; $\frac{B_I}{\mu_0} = \frac{Iw}{l_{ст} + l_в} = 84 \frac{а}{см}$; $\frac{B_J}{\mu_0} = \frac{i_{мол}}{l_{ст} + l_в} = 11916 \frac{а}{см}$; $B_I = 0,01 \frac{в \cdot сек}{м^2} = 100 гс$; $B_J = 14,9 \frac{в \cdot сек}{м^2} = 14900 гс$

Пример

Разложение магнитного поля кольцевого электромагнита с воздушным зазором на его физические составляющие: поле тока возбуждения и поле молекулярных токов

Э.И. Расовский

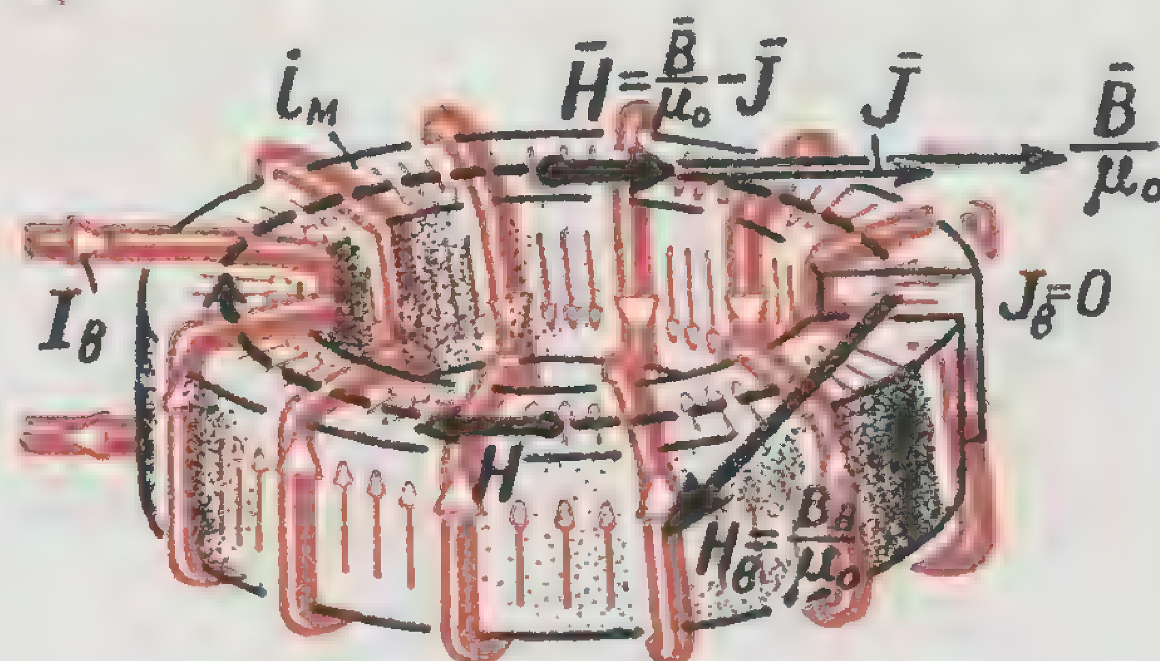
Худ. А. Меньшиков

НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

$\sum_o \frac{\bar{B}}{\mu_o} \Delta \bar{l} = \sum_o (I_в + i_м) = \sum_o I + \sum_o \bar{J} \cdot \Delta \bar{l}$ а

$\sum_o \left(\frac{\bar{B}}{\mu_o} - \bar{J}\right) \Delta \bar{l} = \sum_o I$ а

Закон полного тока при наличии вещества



Кольцевой электромагнит с воздушным зазором

$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_o} - \bar{J}$ $\frac{а}{м}$

НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

$\bar{H} \cdot \Delta \bar{l}$ а

Магнитное напряжение

Введение вектора напряженности магнитного поля, линейная сумма которого по замкнутому контуру непосредственно связана со „свободными" токами (токами возбуждения), позволяет не учитывать в явной форме молекулярных токов вещества, расчеты с которыми затруднительны

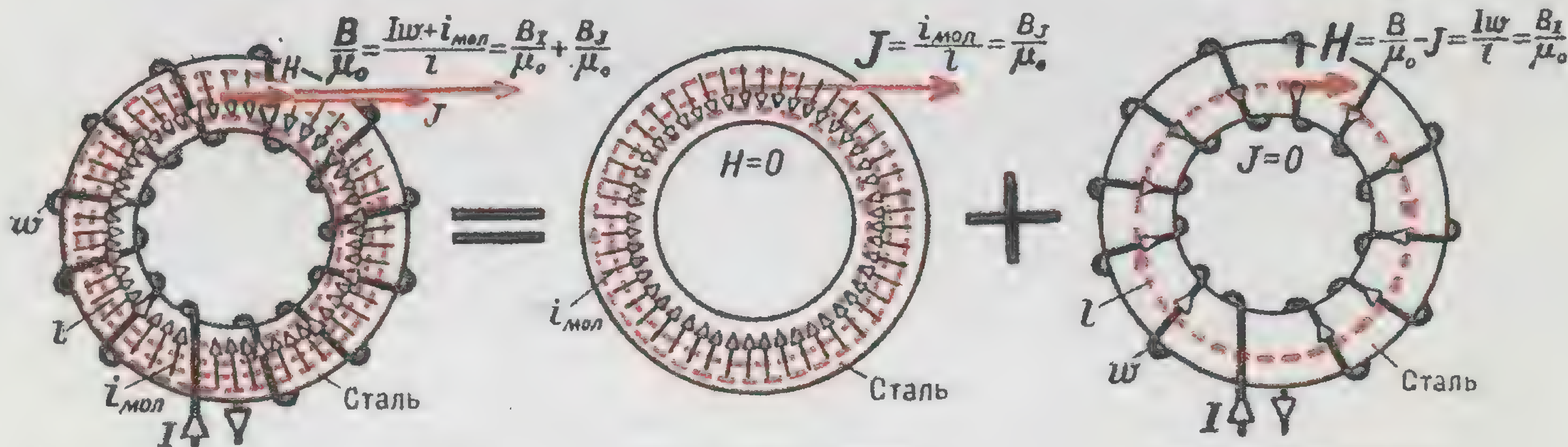
НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ является вспомогательной величиной, равной, в определенной системе единиц, разности векторов магнитной индукции и намагниченности

• В вакууме напряженность поля тождественно совпадает с магнитной индукцией •

$\sum_o \bar{H} \cdot \Delta \bar{l} = \sum_o I$ а

ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА

МАГНИТНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ вдоль произвольного замкнутого контура **РАВНО ПОЛНОМУ ТОКУ** (общему числу ампервитков), охватываемому этим контуром



$B = 15000\,гс$; $\frac{B}{\mu_o} = 12000\,\frac{а}{см}$
$l_{ст} = 40\,см$; $Iw = 1000\,а$; $i_м = \frac{B}{\mu_o} l - Iw = 479000\,а$

$J = \frac{i_м}{l} = 11975\,\frac{а}{см}$
$\mu_o J = B_J = 14969\,гс$

$H = \frac{Iw}{l} = 25\,\frac{а}{см}$
$\mu_o H = B_I = 31\,гс$

РАЗЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ B ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ: НАМАГНИЧЕННОСТЬ $\mu_o J$ И НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ $\mu_o H$
(совпадает с его **физическими** составляющими B_J и B_I. ср. табл. 8)

$H = \frac{Iw}{l}$ $\frac{а}{м}$

Напряженность однородного магнитного поля

НАПРЯЖЕННОСТЬ ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ равна числу ампервитков обмотки возбуждения, приходящемуся на единицу длины магнитной линии
(УДЕЛЬНЫЕ АМПЕРВИТКИ)

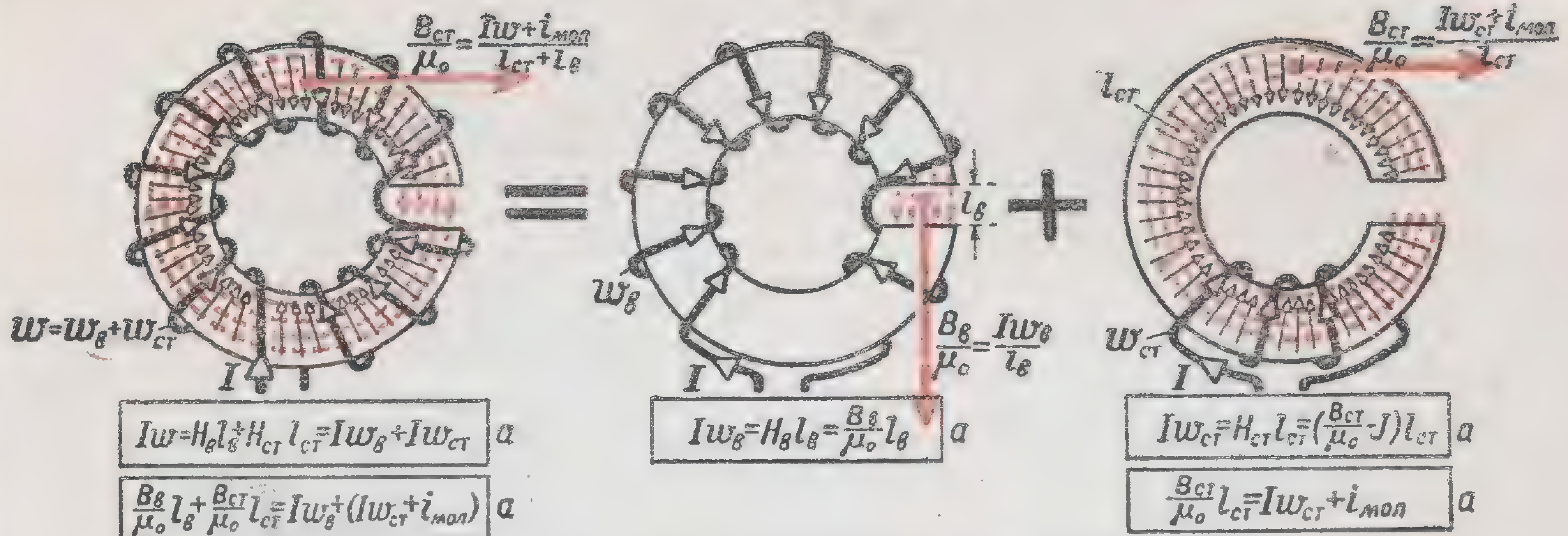
Замкнутый сердечник с однородным полем широко применяется при исследовании магнитных свойств ферромагнитных материалов (см. табл. 11)

Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

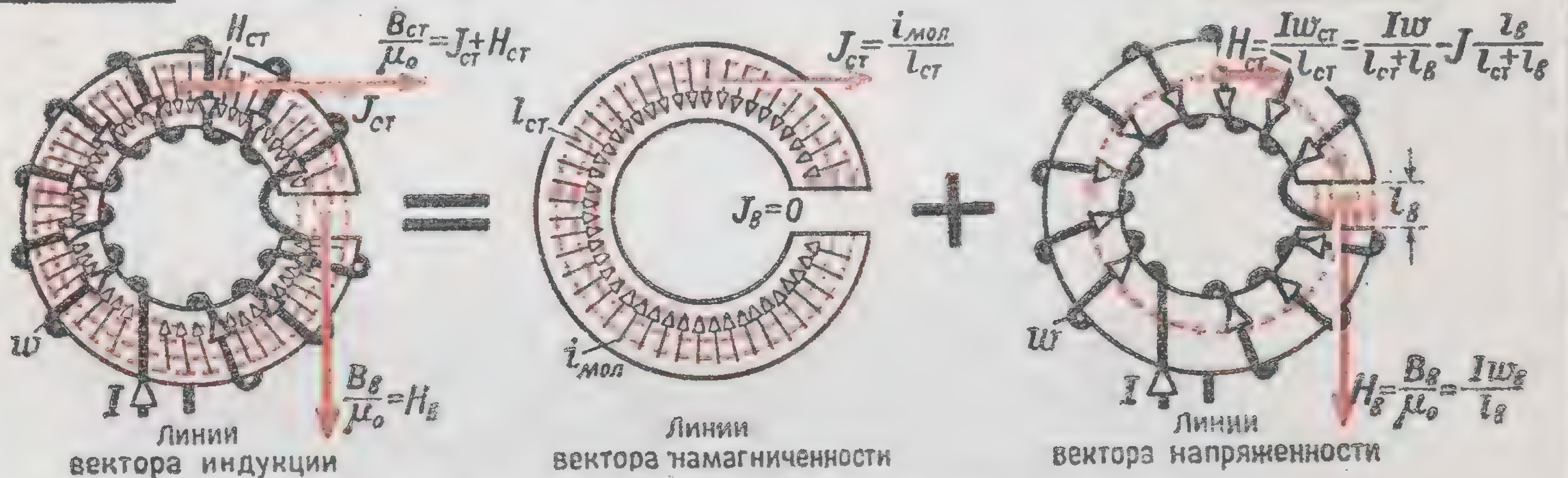
НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

(ПРОДОЛЖЕНИЕ)



РАЗЛОЖЕНИЕ ОБЩЕГО ЧИСЛА АМПЕРВИТКОВ ОБМОТКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА АМПЕРВИТКИ ВОЗДУХА И АМПЕРВИТКИ СТАЛИ

Такое **ИСКУССТВЕННОЕ** разложение позволяет при расчетах магнитных цепей (табл.15) не учитывать в явной форме молекулярных токов намагниченного сердечника



Линии вектора индукции — Линии вектора намагниченности — Линии вектора напряженности

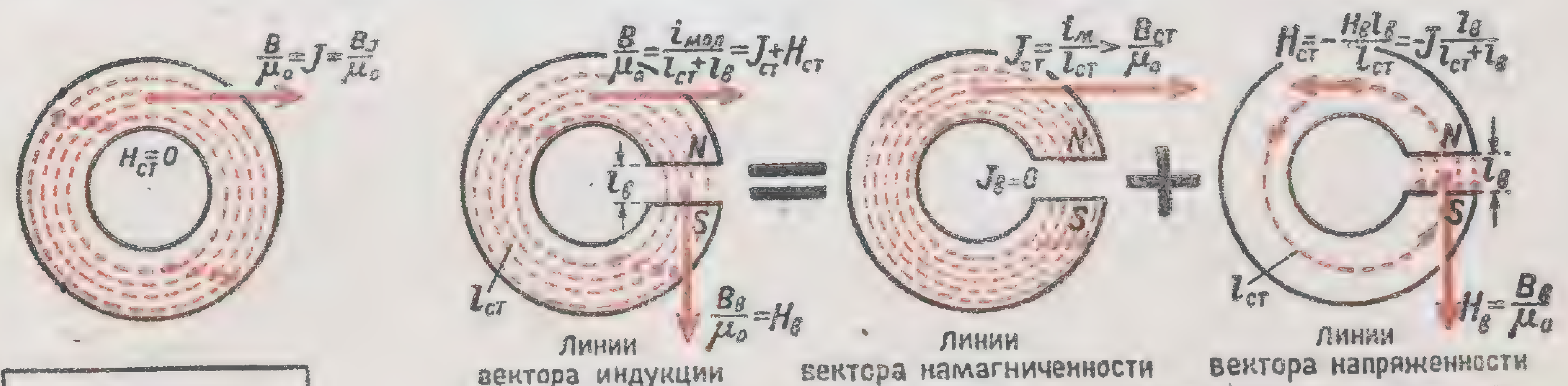
РАЗЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ: НАМАГНИЧЕННОСТЬ И НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Разложение вектора индукции B на составляющие $\mu_0 J$ и $\mu_0 H$ отлично от разложения на его физические составляющие B_J и B_I (табл.8) и является **ФОРМАЛЬНЫМ**. Это разложение применяется для возможности расчетов магнитных полей и магнитных цепей методами расчета электрических полей и электрических цепей (см.табл.15)

$B = 1{,}5\,\frac{в\cdot сек}{м^2} = 15000\,гс$; $l_{ст} = 0{,}4\,м$; $l_в = 2\,мм$; $H_в = \frac{B_в}{\mu_0} = 12000\,\frac{а}{см}$; $H_{ст} = f(B_{ст}) = f(15000) = 25\,\frac{а}{см}$ (по кривой намагничения, табл.12).
$Iw_в = H_в l_в = 2400\,а$; $Iw_{ст} = H_{ст} l_{ст} = 1000\,а$; $Iw = Iw_в + Iw_{ст} = 3400\,а$; $J_{ст} = \frac{B_{ст}}{\mu_0} - H_{ст} = 11975\,\frac{а}{см}$.

Пример (сравни табл. 8)

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТА С ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ



Линии вектора индукции — Линии вектора намагниченности — Линии вектора напряженности

$B = 10000\,гс$
$\frac{B}{\mu_0} = J = 8000\,\frac{а}{см}$

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ СПЛОШНОГО СТАЛЬНОГО КОЛЬЦА

РАЗЛОЖЕНИЕ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ: $\mu_0 J$ и $\mu_0 H$

$B = B_{ст} = B_в = 1\,\frac{в\cdot сек}{м^2} = 10000\,гс$; $l_{ст} = 0{,}4\,м$; $l_в = 2\,мм$;
$H_в = \frac{B_в}{\mu_0} = 8000\,\frac{а}{см}$; $H_{ст} = -\frac{H_в l_в}{l_{ст}} = -40\,\frac{а}{см}$; $J_{ст} = \frac{B_{ст}}{\mu_0} - H_{ст} = 8040\,\frac{а}{см}$

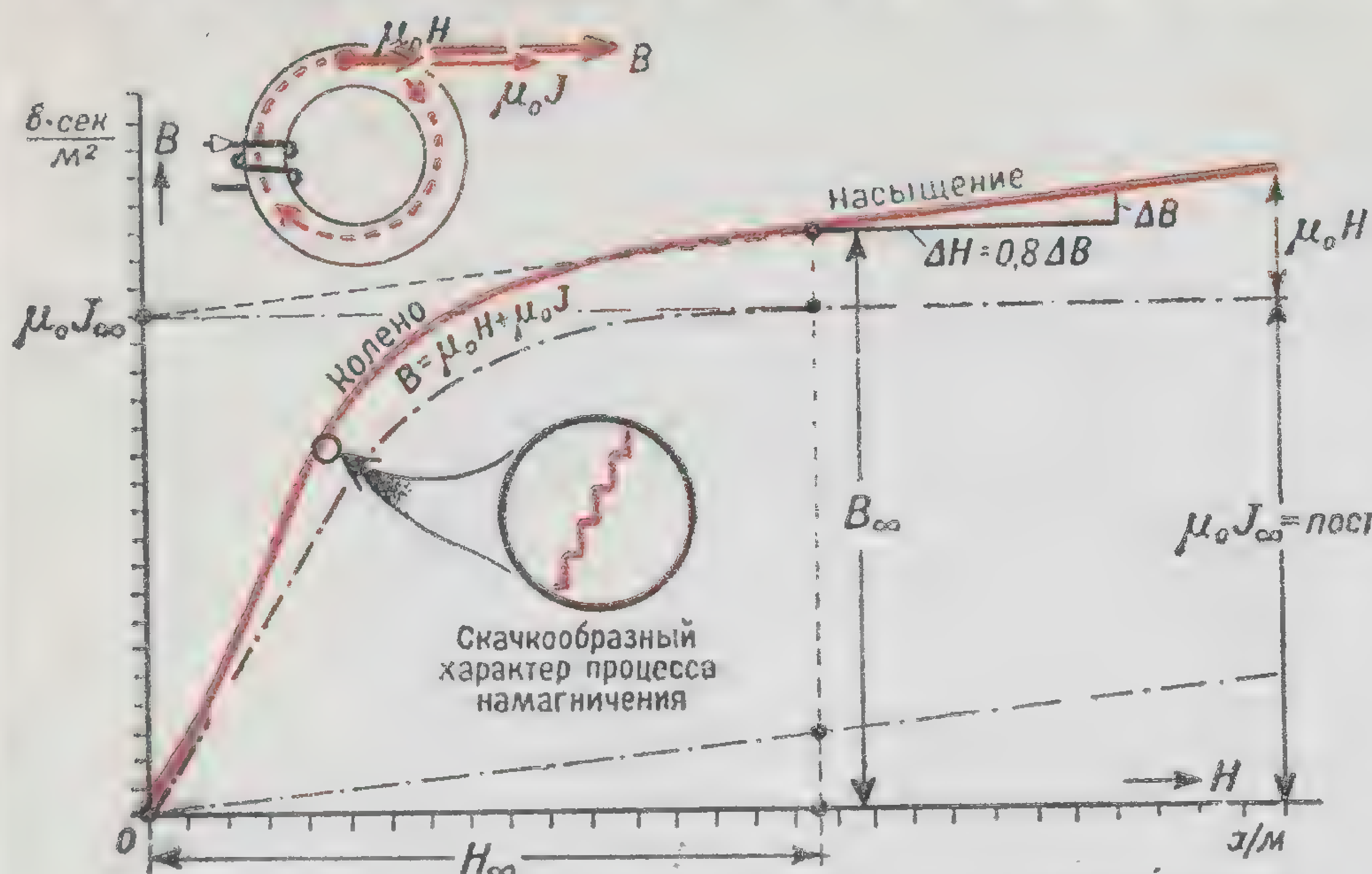
Пример (сравни табл. 8)

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОЛЬЦЕВОГО МАГНИТА С ВОЗДУШНЫМ ЗАЗОРОМ

Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

КРИВАЯ НАМАГНИЧЕНИЯ И ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА



Первоначальная кривая намагничения
(Впервые исследована А.Г.Столетовым в 1872 г.)

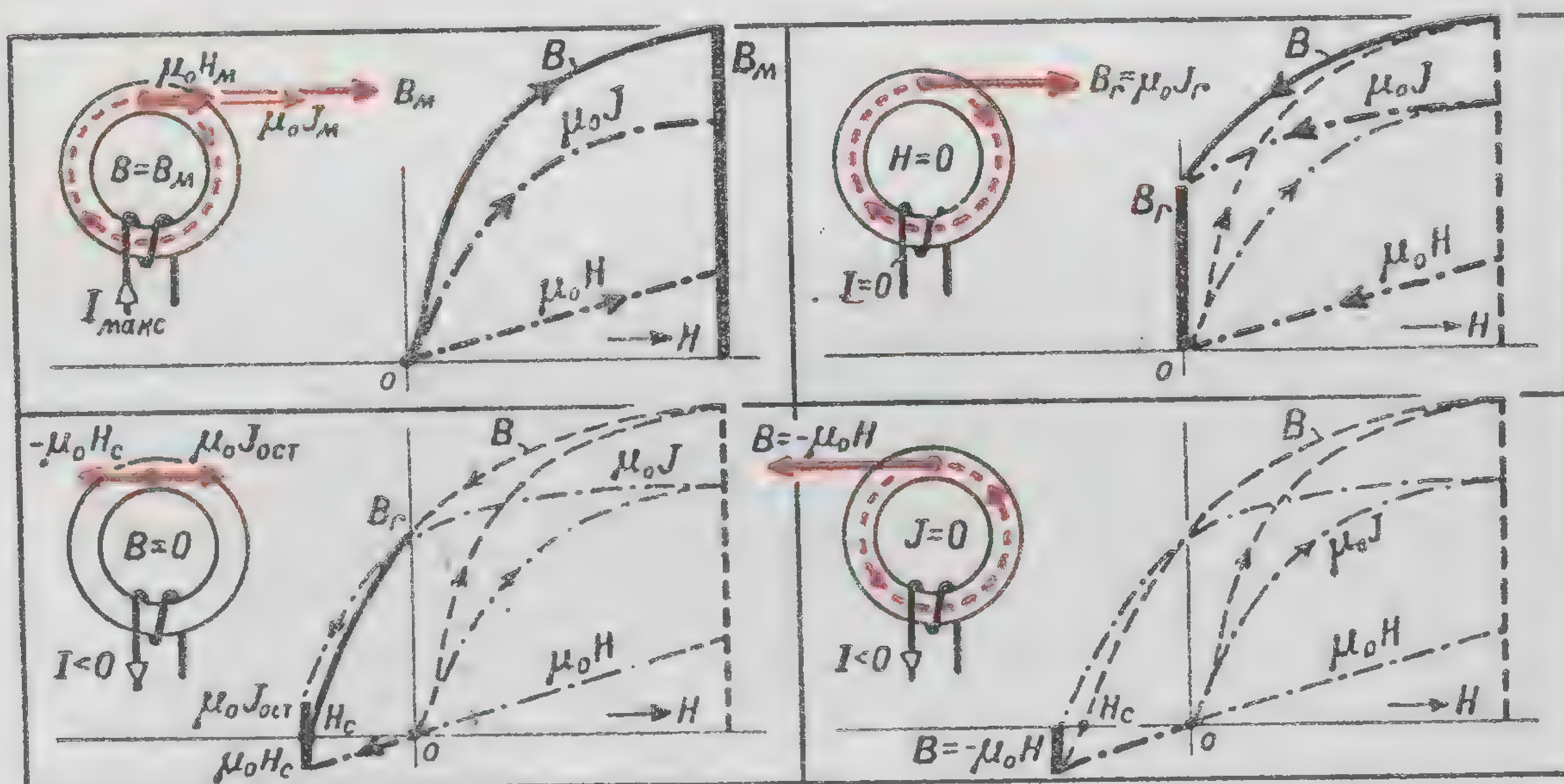
$$B=\mu_o J_\infty+1{,}256\cdot10^{-6}\,H_{a/м}\quad \frac{в\cdot сек}{м^2}$$

или

$$B=\mu_o J_\infty+1{,}256\,H_{a/см}\quad гс$$

$$H=0{,}8\,(B_{гс}-\mu_o J_\infty)\quad \frac{a}{см}$$

Вычисление индукции и напряженности поля за пределом насыщения



РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ИСПЫТУЕМОГО ОБРАЗЦА



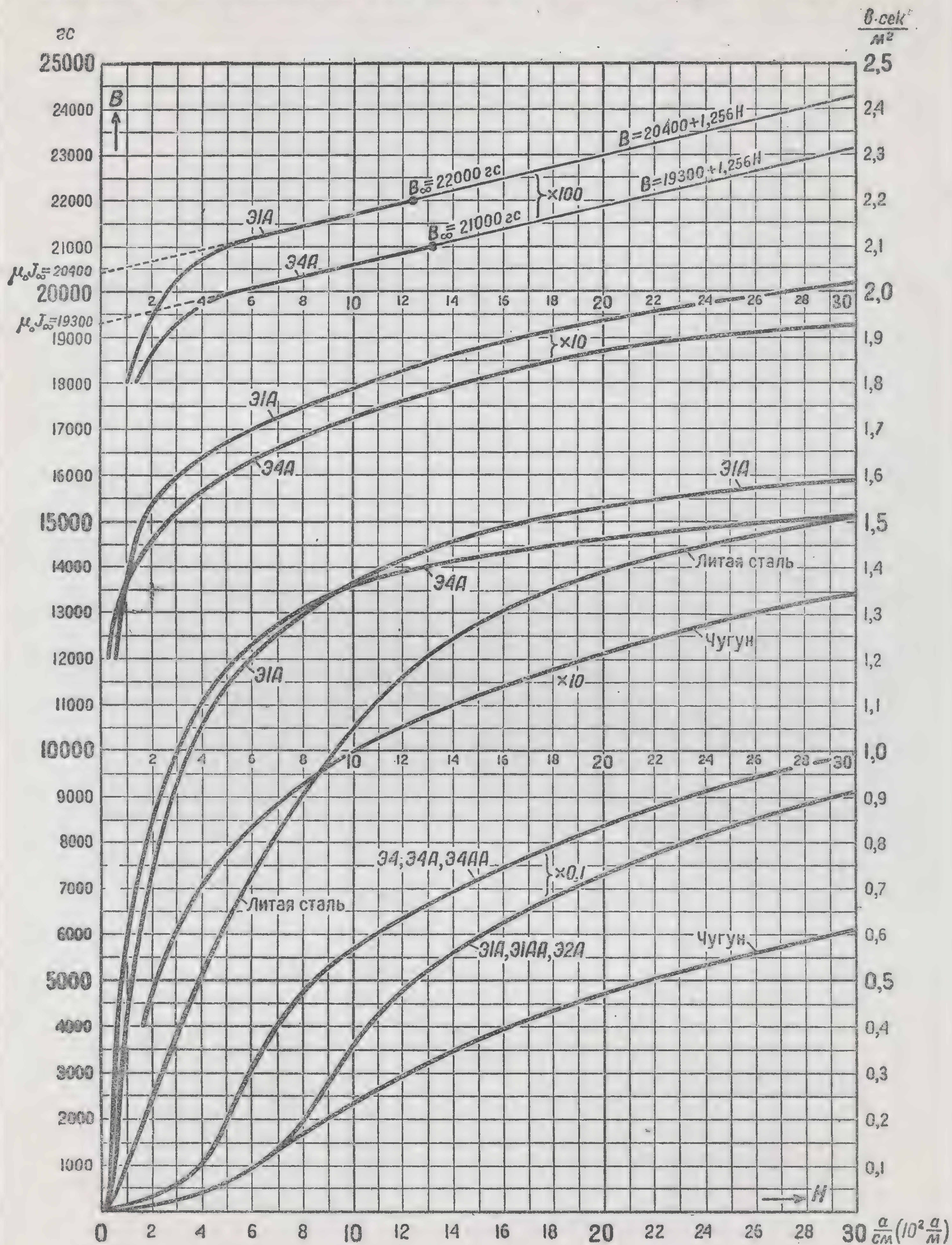
ПЕТЛЯ ГИСТЕРЕЗИСА



Э.И Расовский

Худ. А.Меньшиков

КРИВЫЕ НАМАГНИЧЕНИЯ СТАЛИ И ЧУГУНА



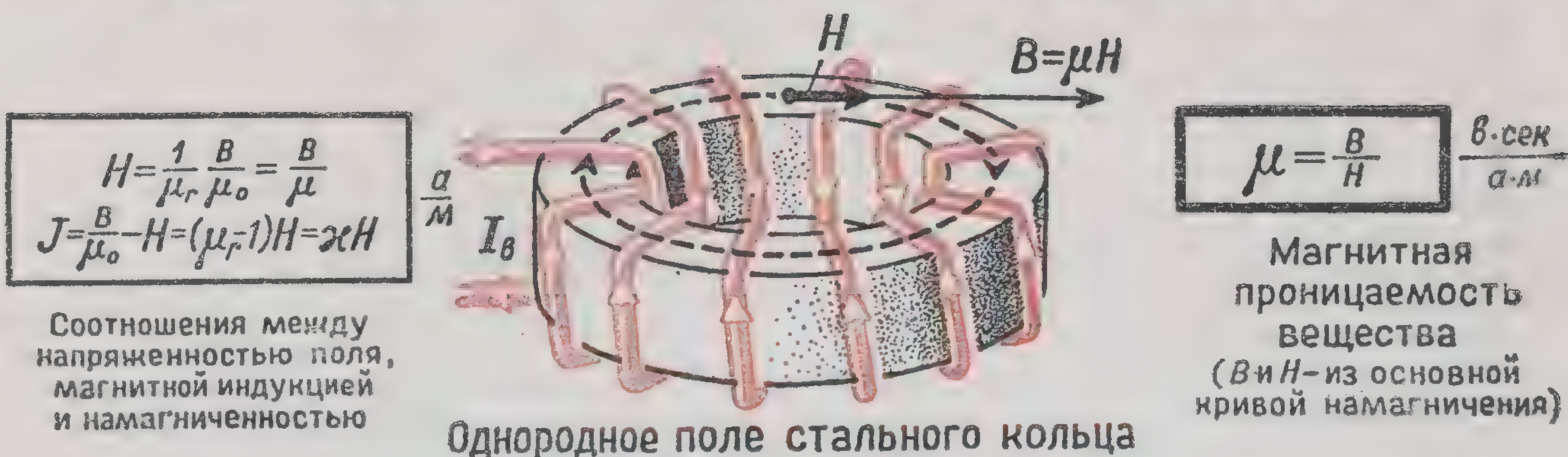
Э1, Э2, Э4 — листовая электротехническая сталь, содержащая 1-4% кремния

×0,1; ×10; ×100 — множители масштаба напряженности поля H

Э.И.Расовский

Худ А.Меньшиков

МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ



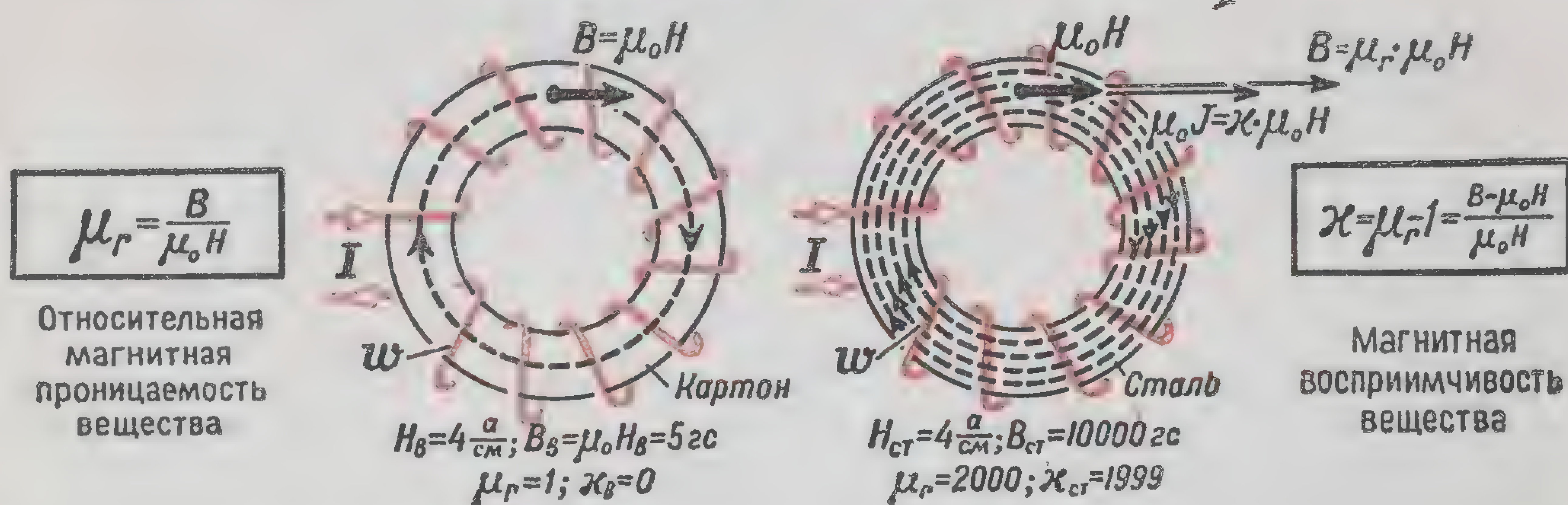
$$H=\frac{1}{\mu_r}\frac{B}{\mu_0}=\frac{B}{\mu}$$
$$J=\frac{B}{\mu_0}-H=(\mu_r-1)H=\varkappa H$$

Соотношения между напряженностью поля, магнитной индукцией и намагниченностью

Однородное поле стального кольца

$$\mu=\frac{B}{H}\quad\frac{в\cdot сек}{а\cdot м}$$

Магнитная проницаемость вещества (B и H – из основной кривой намагничения)



$$\mu_r=\frac{B}{\mu_0 H}$$

Относительная магнитная проницаемость вещества

$H_в=4\frac{а}{см}$; $B_в=\mu_0 H_в=5\,гс$; $\mu_r=1$; $\varkappa_в=0$

$H_{ст}=4\frac{а}{см}$; $B_{ст}=10000\,гс$; $\mu_r=2000$; $\varkappa_{ст}=1999$

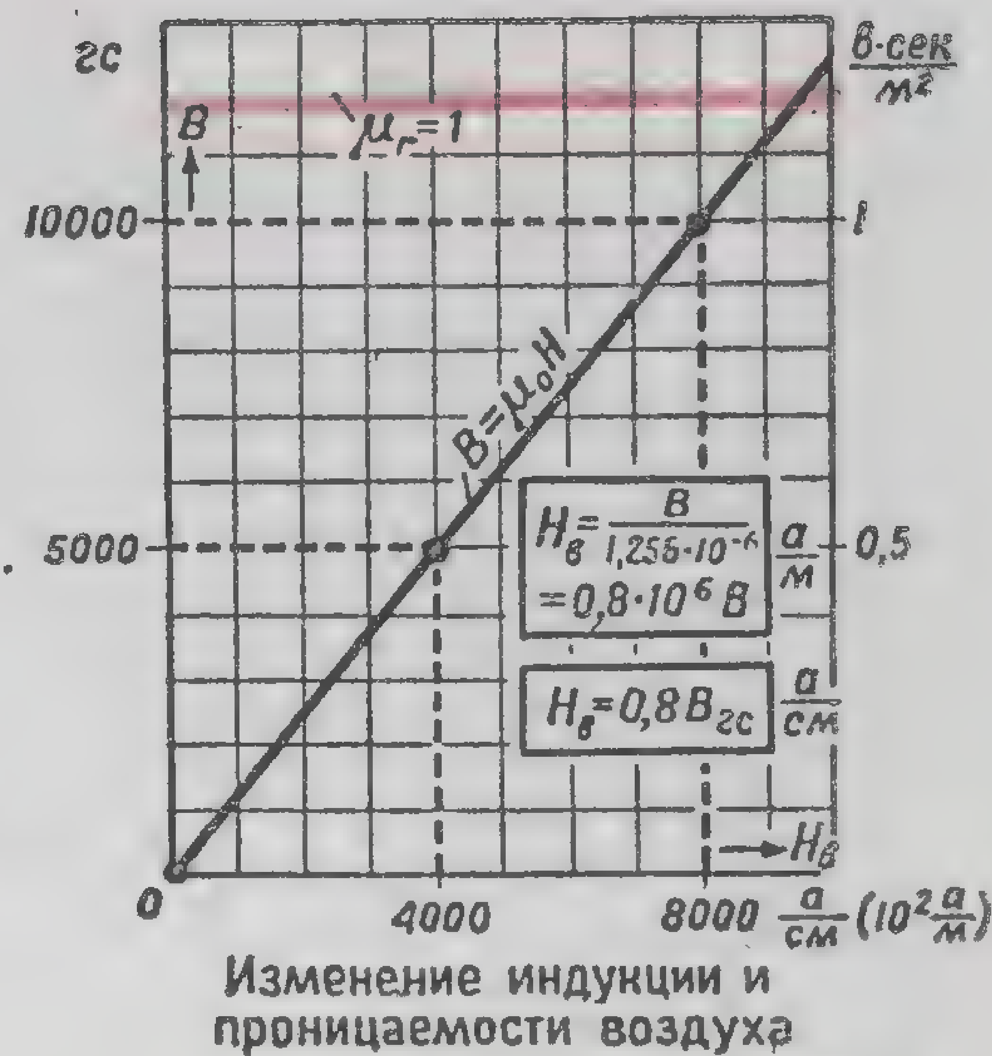
$$\varkappa=\mu_r-1=\frac{B-\mu_0 H}{\mu_0 H}$$

Магнитная восприимчивость вещества

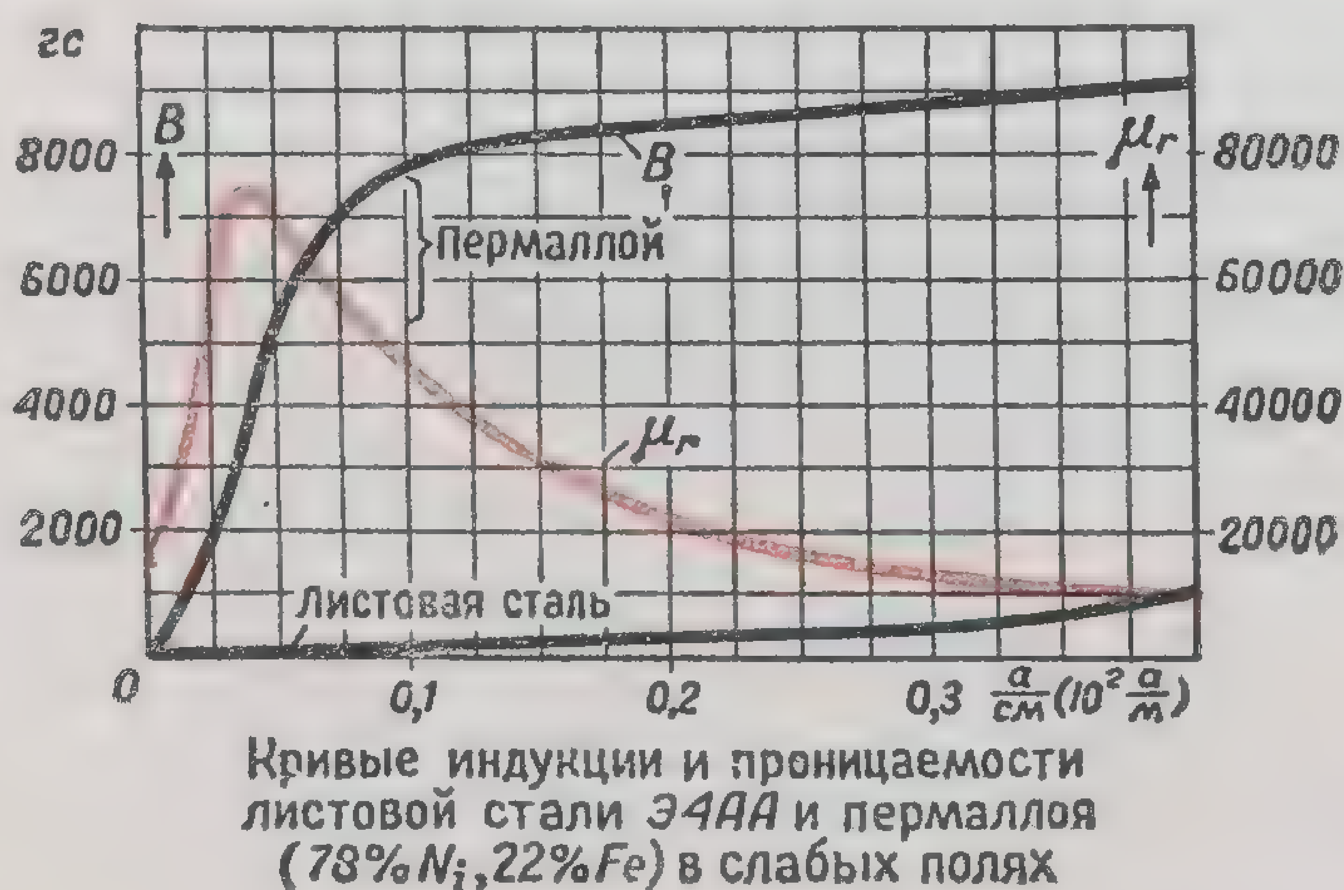
При постоянной напряженности однородного магнитного поля **относительная магнитная проницаемость** вещества показывает, **во сколько раз** возрастает магнитная индукция, а **магнитная восприимчивость – на сколько**, в относительных единицах, возрастает магнитная индукция при замене вакуума данным веществом



Кривые индукции и проницаемости листовой стали марки Э4АА



Изменение индукции и проницаемости воздуха



Кривые индукции и проницаемости листовой стали Э4АА и пермаллоя ($78\%\,Ni$, $22\%\,Fe$) в слабых полях

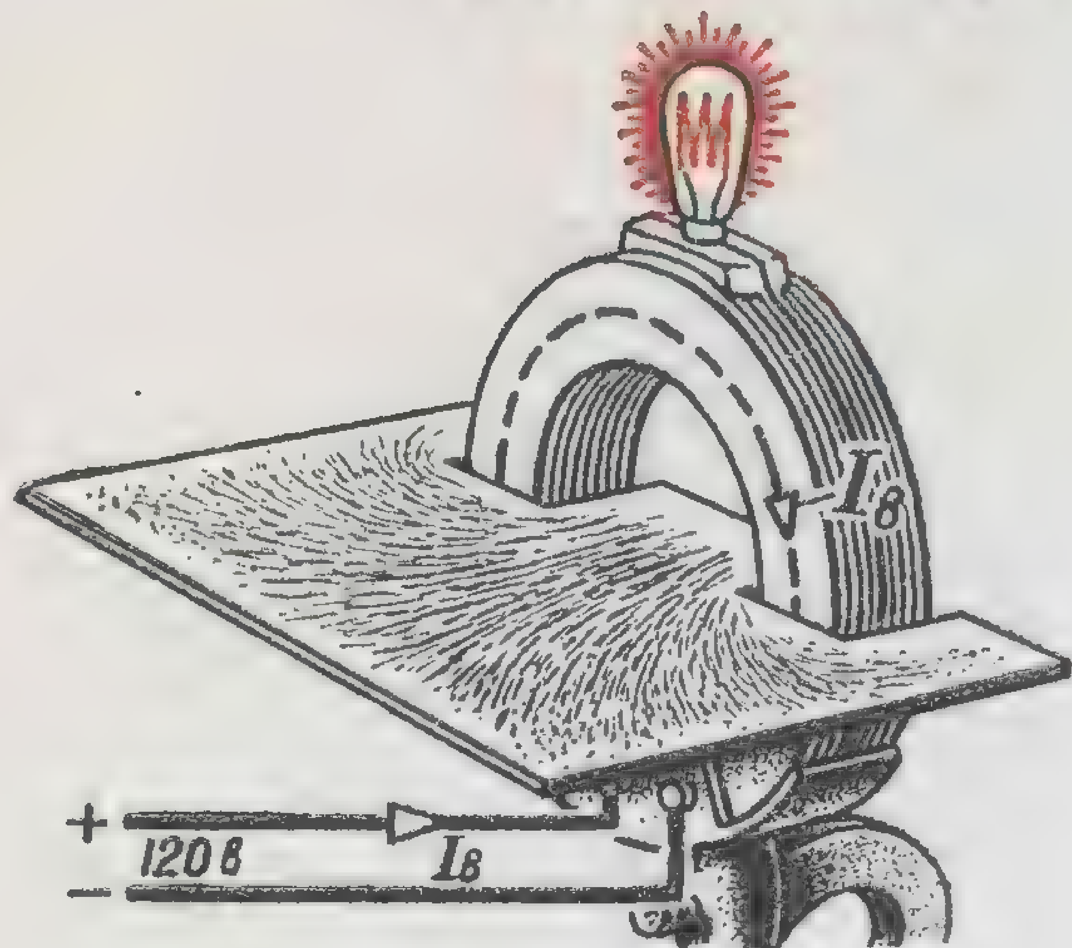


„Спинка" предельной петли гистерезиса для вольфрамовой стали ($6\%\,W$; $0,4\%\,Mn$; $0,6\%\,C$; $93\%\,Fe$; $B_r=1,08\frac{в\cdot сек}{м^2}$; $H_c=4800\frac{а}{м}$; $\mu_в=32$)

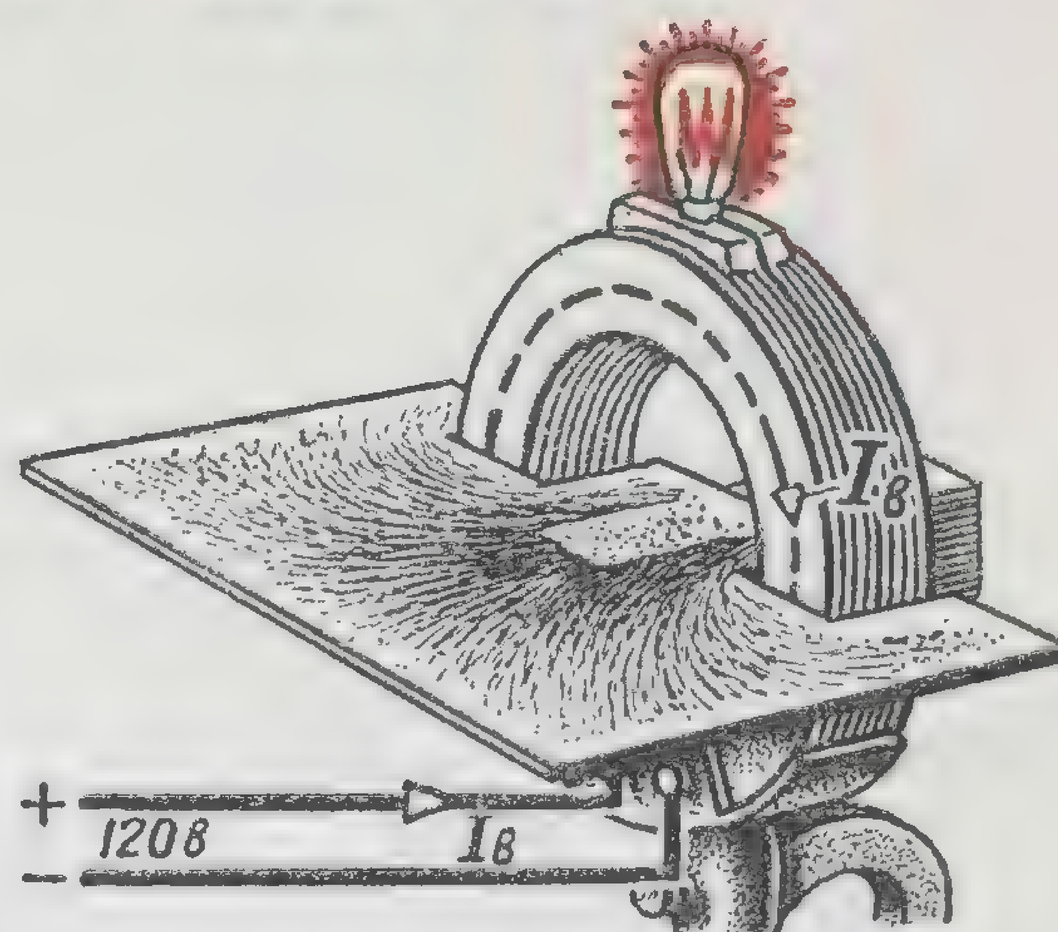
Э.И.Расовский

Худ. А.Меньшиков

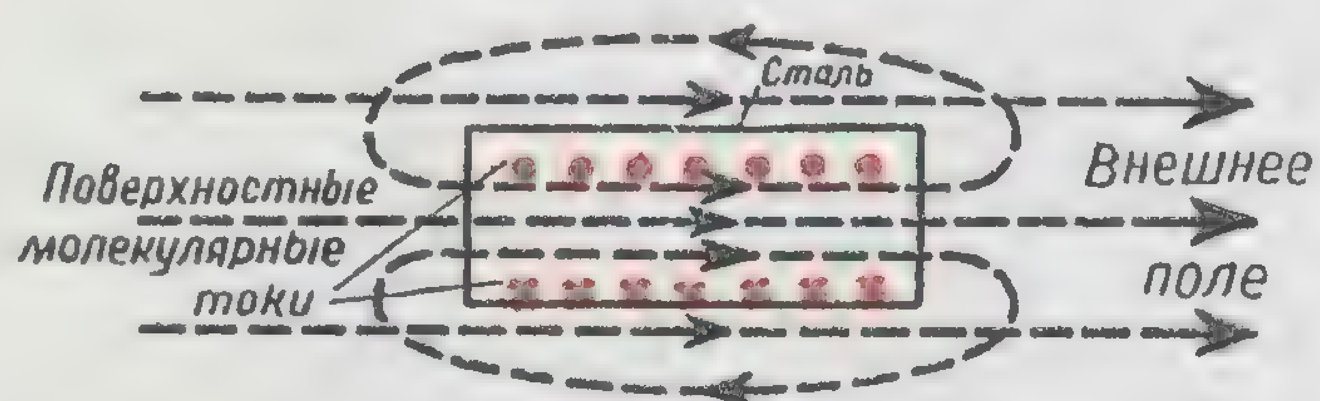
МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ



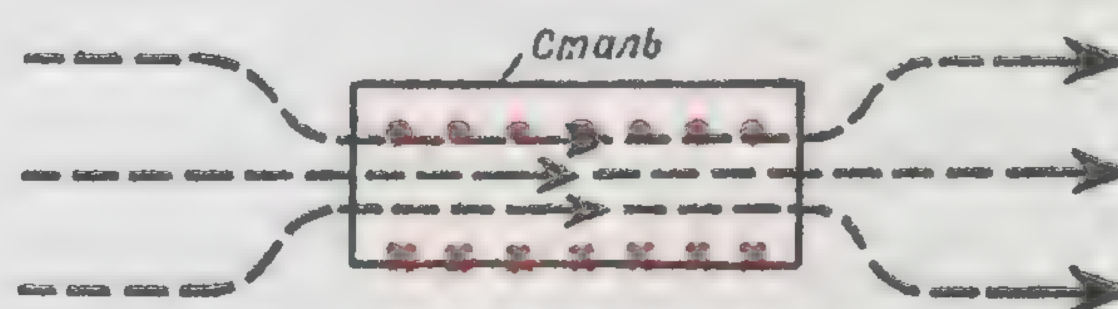
Магнитное поле катушки с током



Изменение („сгущение") поля стальным сердечником

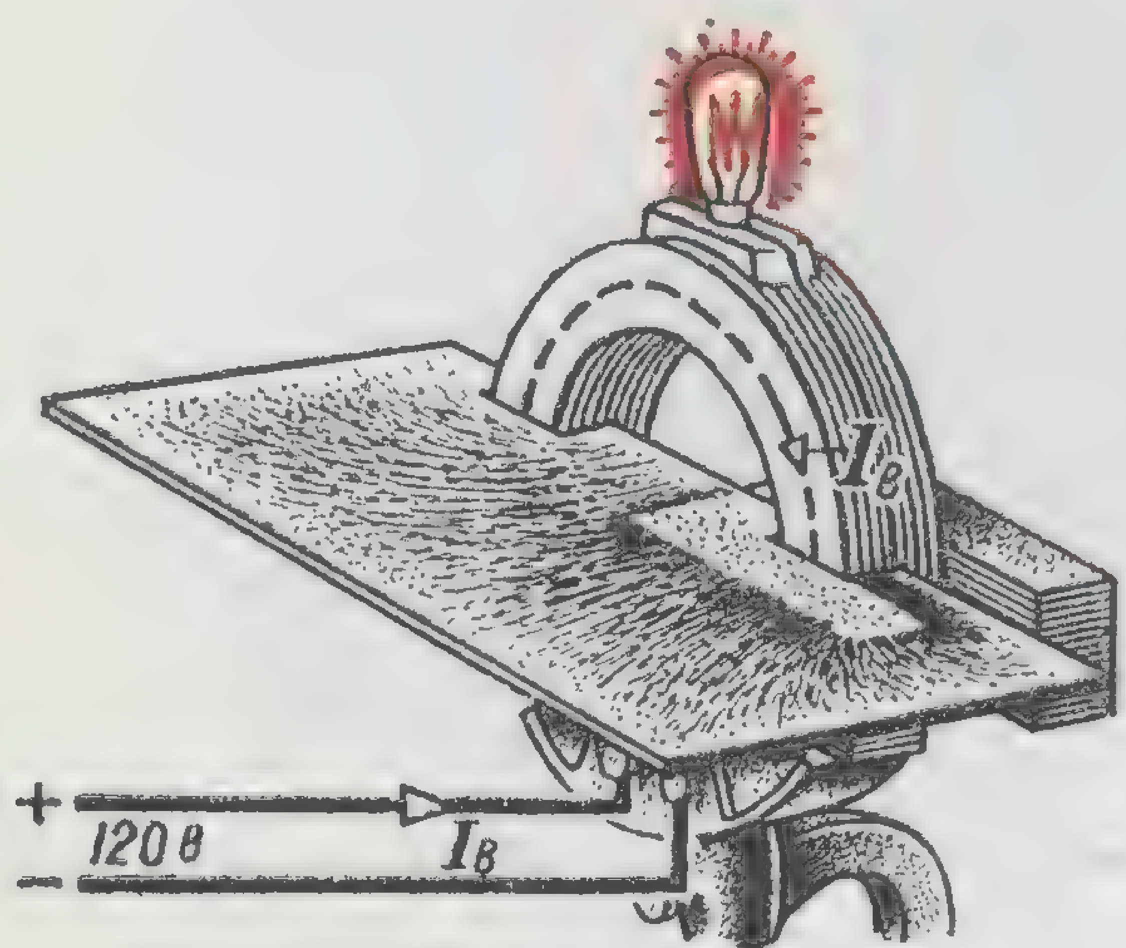


Наложение полей: внешнего и от молекулярных токов

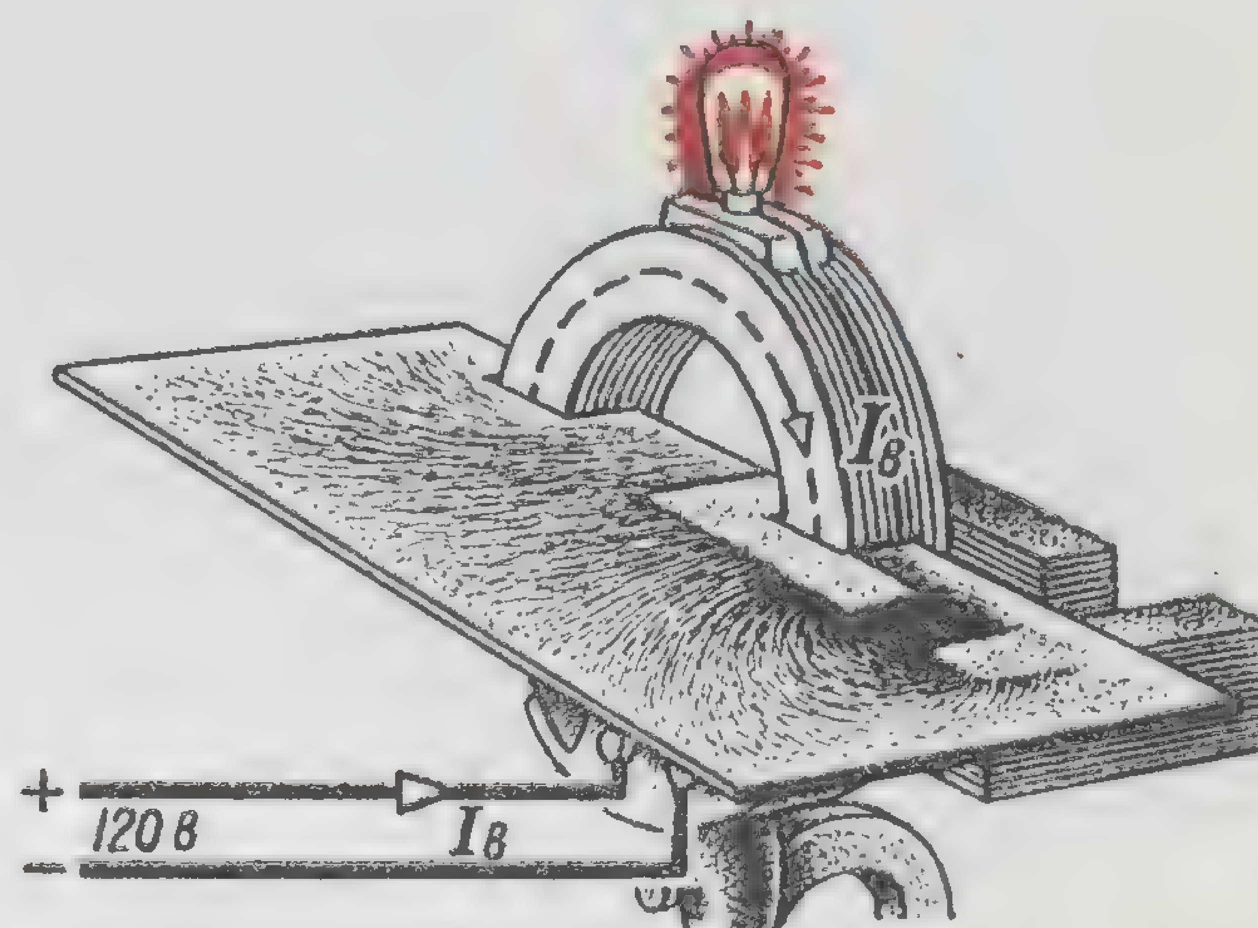


Результирующее поле

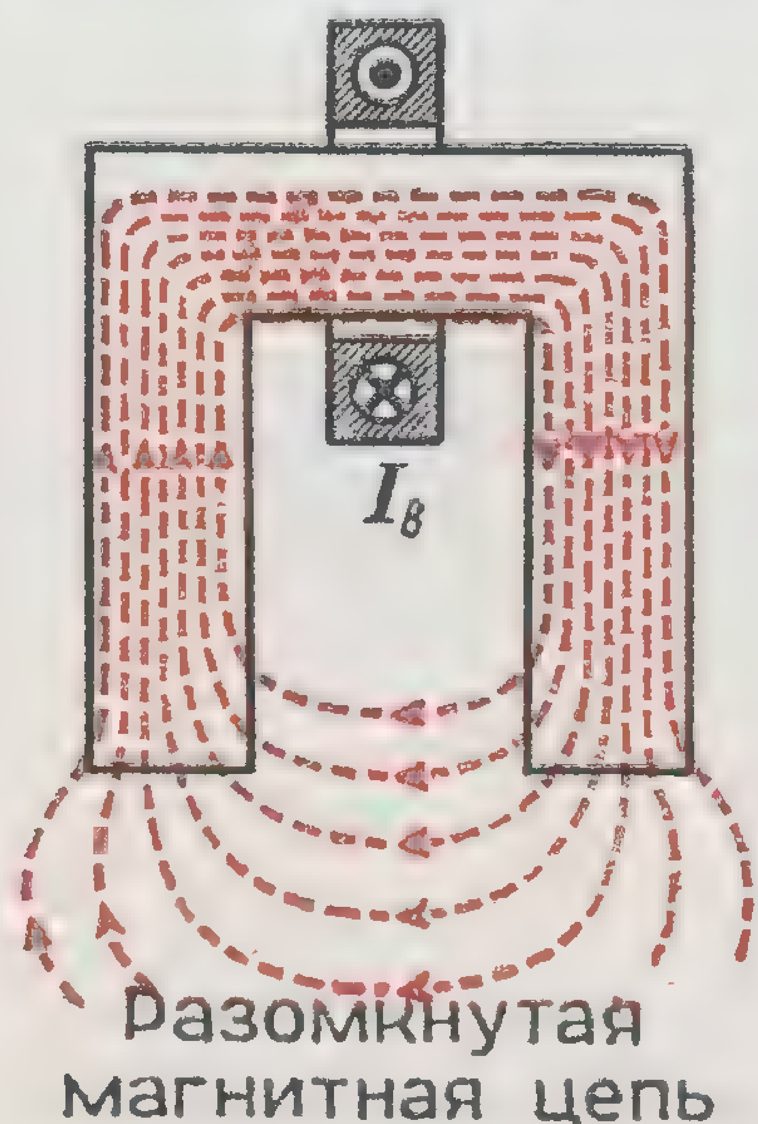
Изменение магнитного поля под влиянием молекулярных токов в стали



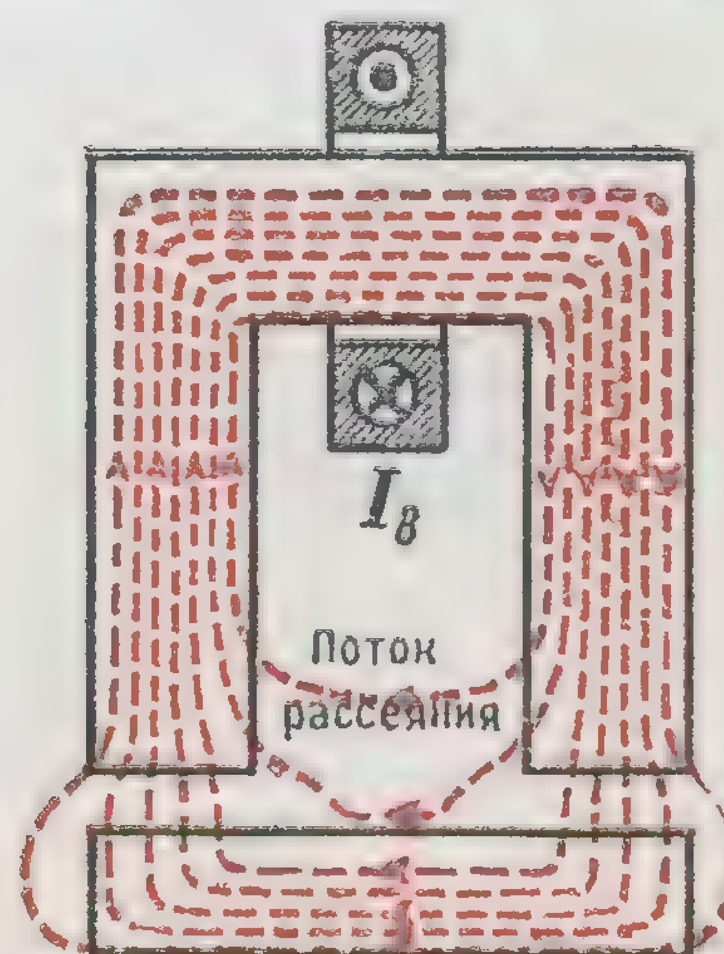
Поле катушки с П-образным сердечником



Поле катушки с замкнутым стальным сердечником



Разомкнутая магнитная цепь

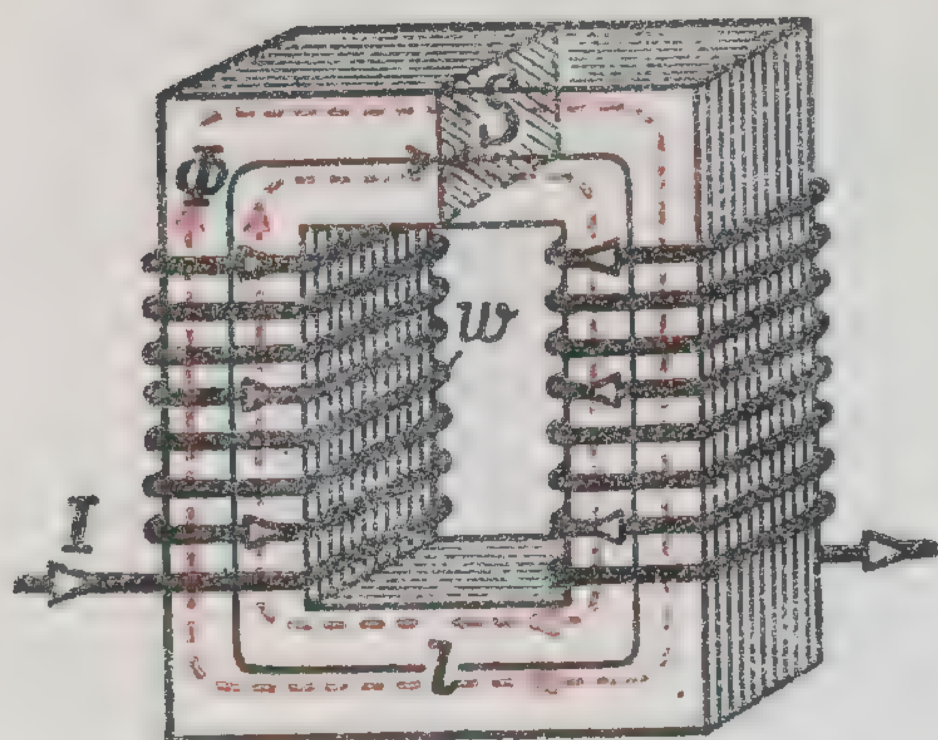


Замкнутая цепь с магнитным рассеянием

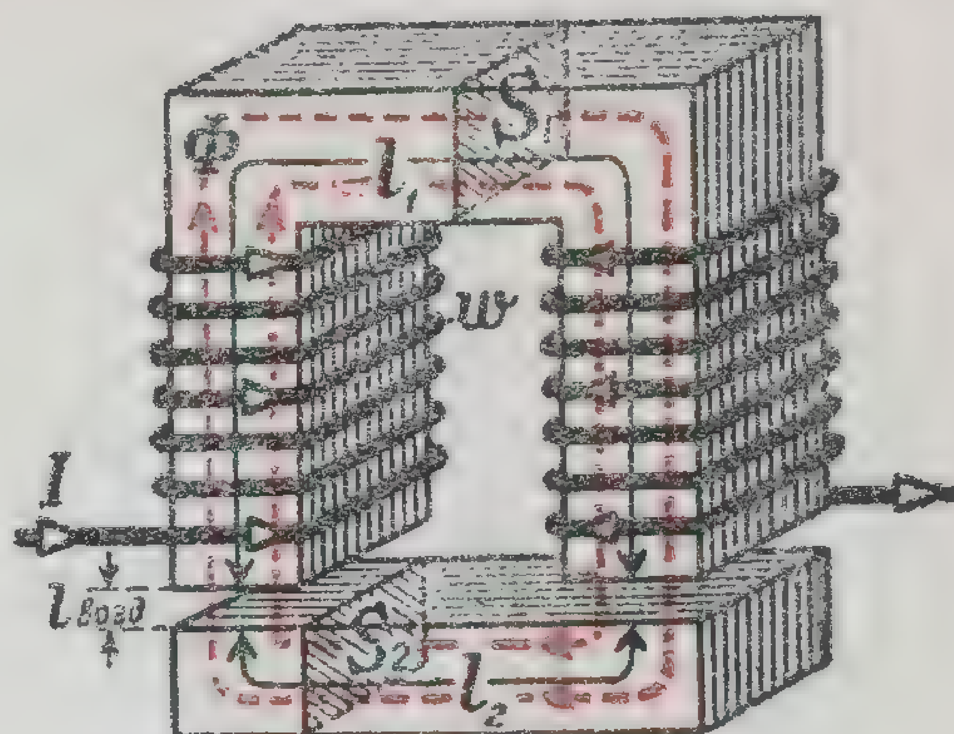
Э. И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ



Простейшая замкнутая цепь



Цепь с воздушным зазором без рассеяния

$$Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots = \Phi\left(\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \dots\right) = \Phi R_м \quad а$$

Полный ток (ампервитки) обмотки возбуждения

$$\Phi = \frac{Iw}{R_м} \quad в \cdot сек$$

Закон Ома для магнитной цепи

$$R_м = \frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \dots \quad \frac{а}{в \cdot сек}$$

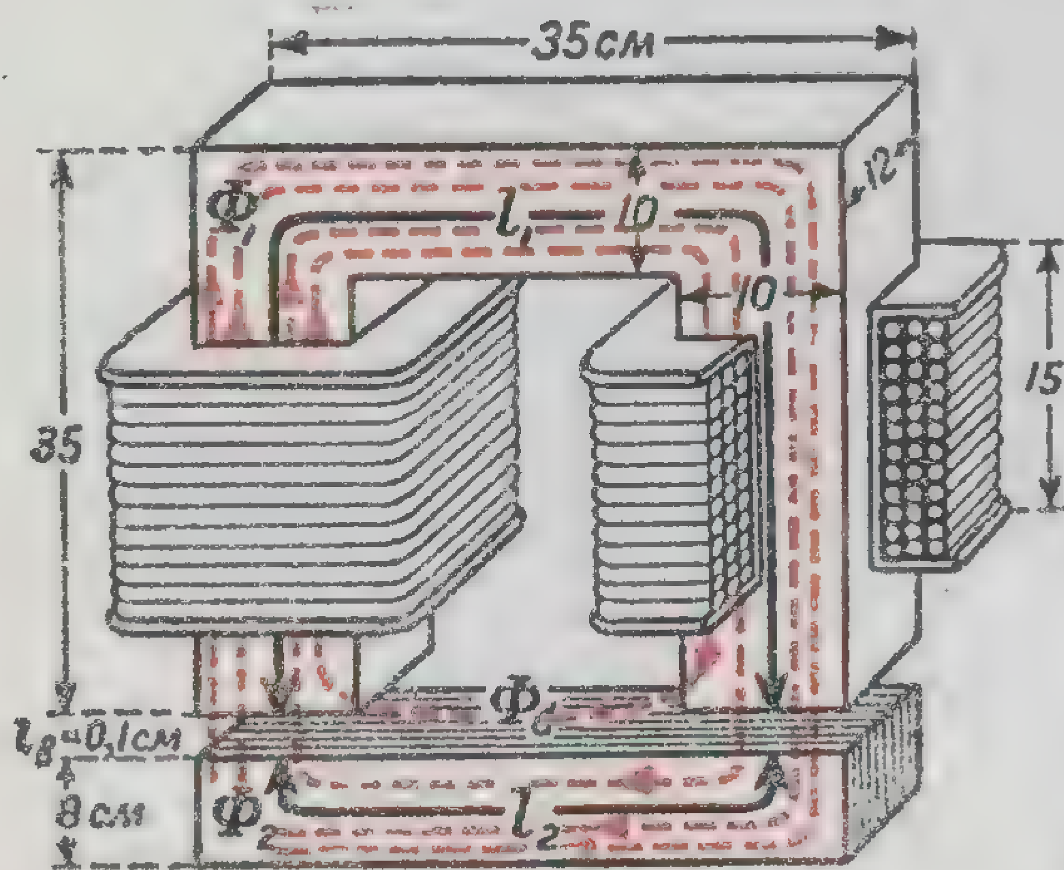
Магнитное сопротивление

Расчет магнитной цепи производится по закону полного тока и при помощи кривых намагничения

$l_1 + l_2 = 1{,}2$ м (сталь ЭЧАА); $2l_в = 2$ мм; $S_1 = S_2 = S_в = 40\ см^2$; $B_{ст} = B_в = 1\ \frac{в \cdot сек}{м^2} = 10000$ гс; $\Phi = BS = 0{,}004$ в·сек.
По кривой намагничения (табл. 12): $H_{ст} = f(B_{ст}) = f(10000) = 3\ \frac{а}{см}$;
$H_в = 0{,}8\ B_в = 8000\ \frac{а}{см}$; $Iw = \Sigma_0 Hl = H_{ст} l_{ст} + H_в 2l_в = 360 + 1600 = 1960$ а.
При тех же ампервитках и отсутствии воздушного зазора: $H_{ст} = \frac{Iw}{l_{ст}} = \frac{1960}{120} = 16{,}3\ \frac{а}{см}$; $B_{ст} = f(16{,}3) = 14350$ гс

Пример

ЦЕПИ БЕЗ МАГНИТНОГО РАССЕЯНИЯ



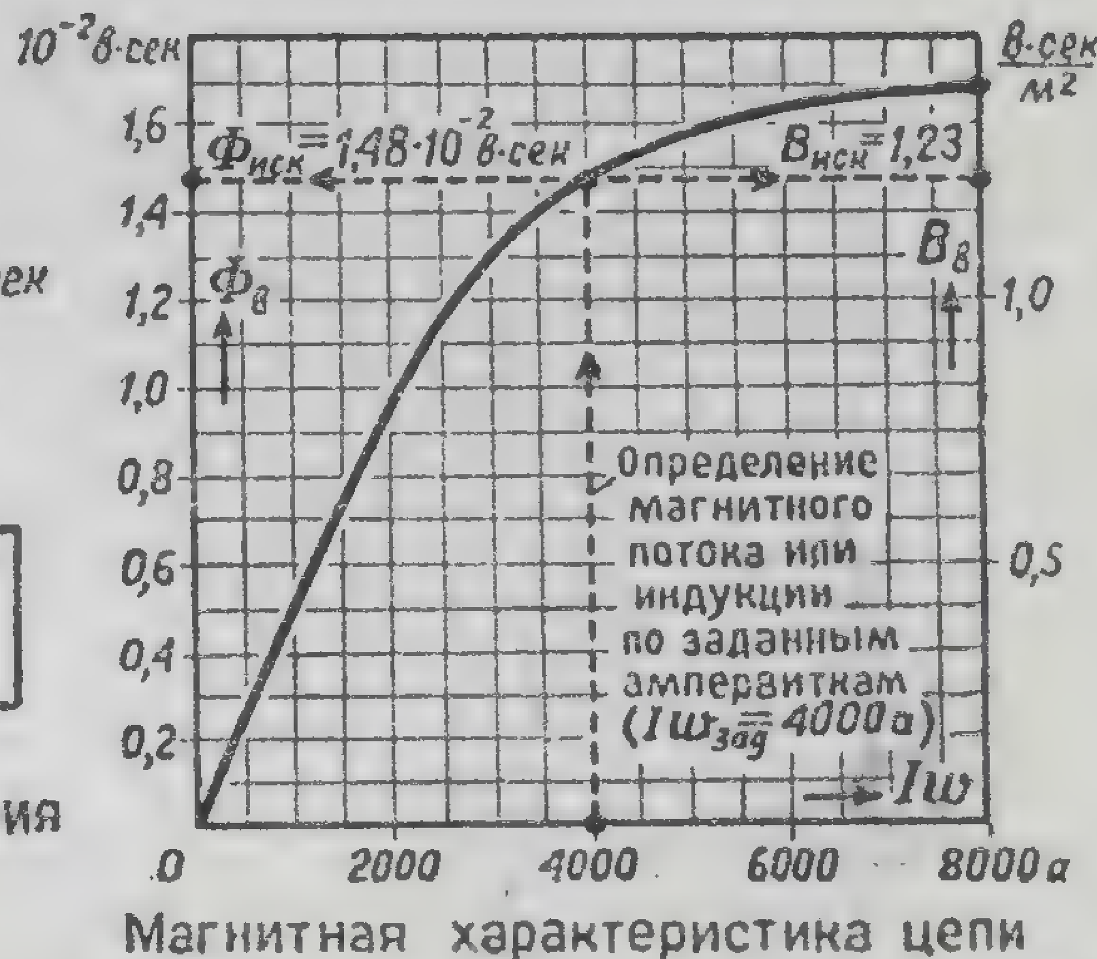
Неразветвленная цепь с магнитным рассеянием

$$\Phi_\sigma = \Phi_1 - \Phi_2 \quad в \cdot сек$$

Поток рассеяния

$$\sigma_{12} = \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_2}$$

Коэффициент магнитного рассеяния



Магнитная характеристика цепи

Полный ток по заданному магнитному потоку (или индукции) определяется при помощи кривых намагничения. Магнитный поток по заданным ампервиткам определяется из построенной для цепи магнитной характеристики

ПРИМЕР (см. рисунок): $l_1 = 25 \cdot 2 + 15 + \pi \cdot 5 = 80$ см (литая сталь); $S_1 = S_в = 10 \cdot 12 = 120\ см^2$; $l_2 = 15 + \pi \cdot 4 = 28$ см (сталь Э1А); $S_2 = 8 \cdot 12 = 96\ см^2$; $2l_в = 0{,}2$ см; $Iw = 4000$ а.
Для ряда значений индукции $B_в$ в воздушном зазоре определяют нужную величину полного тока:
$\Phi_2 = \Phi_в = B_в S_в$; $\Phi_1 = \Phi_2 \sigma_{12}$; $B_2 = \frac{\Phi_2}{S_2}$; $B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1}$; $H_1 = f(B_1)$; $H_2 = f(B_2)$; $H_в = 0{,}8 B_в$; $Iw = \Sigma_0 Hl = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_в \cdot 2l_в$.
По результатам вычислений (см. таблицу) строят магнитную характеристику цепи.

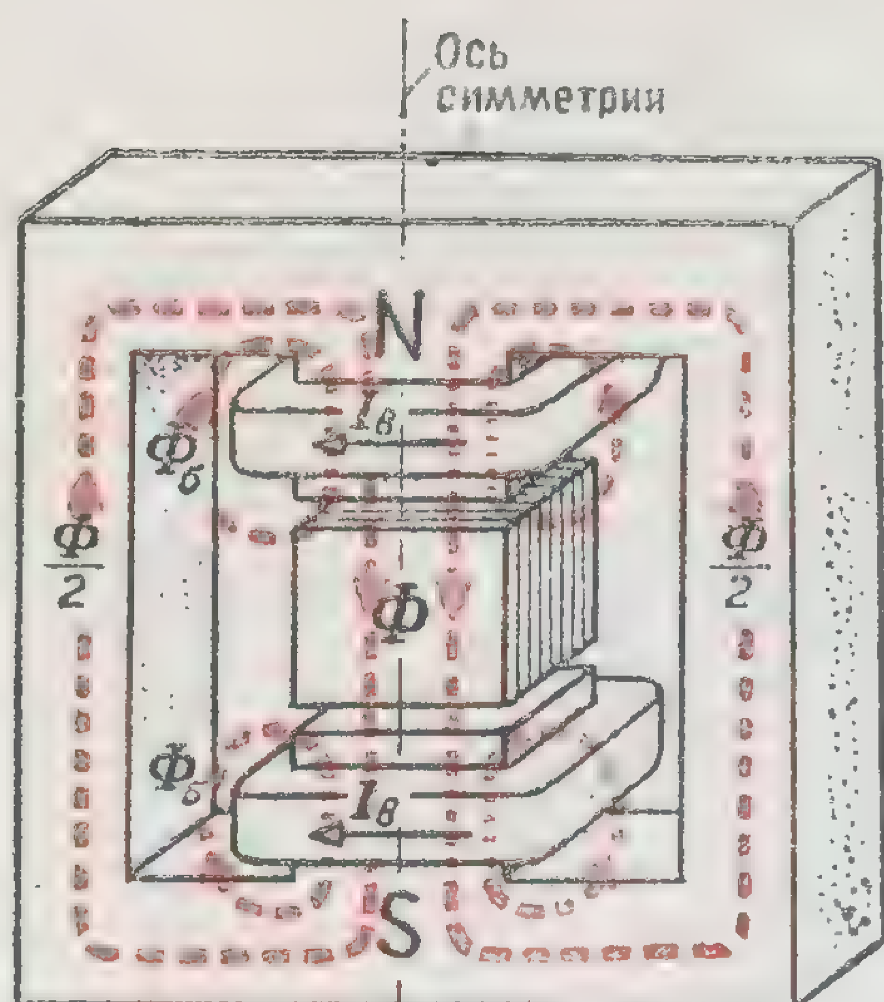
№	Φ_1	$\Phi_2 = \Phi_в$	B_1	B_2	$B_в$	H_1	H_2	$H_в$	$H_1 l_1$	$H_2 l_2$	$H_в 2l_в$	Iw
	в·сек	в·сек	в·сек/м²	в·сек/м²	в·сек/м²	а/см	а/см	а/см	а	а	а	а
1	$0{,}79 \cdot 10^{-2}$	$0{,}72 \cdot 10^{-2}$	0,66	0,75	0,6	5,44	2,09	4800	440	58,5	960	1458
2	$1{,}06 \cdot 10^{-2}$	$0{,}96 \cdot 10^{-2}$	0,88	1,0	0,8	7,76	4,08	6400	625	114	1280	2020
3	$1{,}32 \cdot 10^{-2}$	$1{,}2 \cdot 10^{-2}$	1,1	1,25	1,0	10,9	7,03	8000	880	198	1600	2680
4	$1{,}58 \cdot 10^{-2}$	$1{,}44 \cdot 10^{-2}$	1,32	1,5	1,2	16,7	17,3	9600	1350	485	1920	3755
5	$1{,}85 \cdot 10^{-2}$	$1{,}68 \cdot 10^{-2}$	1,54	1,75	1,4	33,2	82	11200	2700	2300	2240	7240

ЦЕПИ С МАГНИТНЫМ РАССЕЯНИЕМ

З.И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

РАЗВЕТВЛЕННАЯ МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ



Разветвленная симметричная цепь

$$\sum_0 \Phi = 0 \quad \text{в·сек}$$

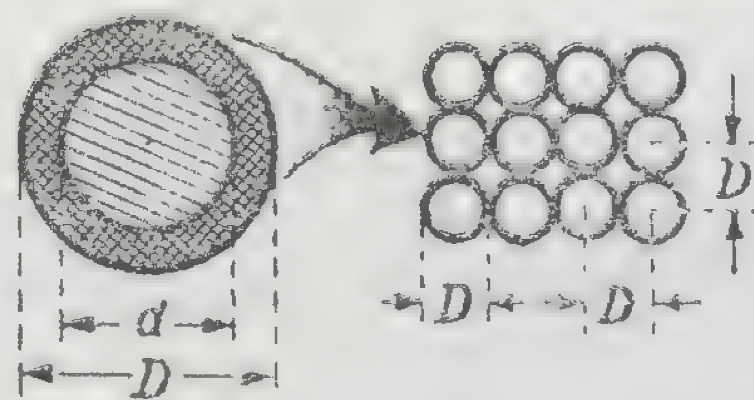
$$\sum_0 Iw = \sum_0 \Phi R_м \quad \text{а}$$

Законы Кирхгофа для магнитной цепи



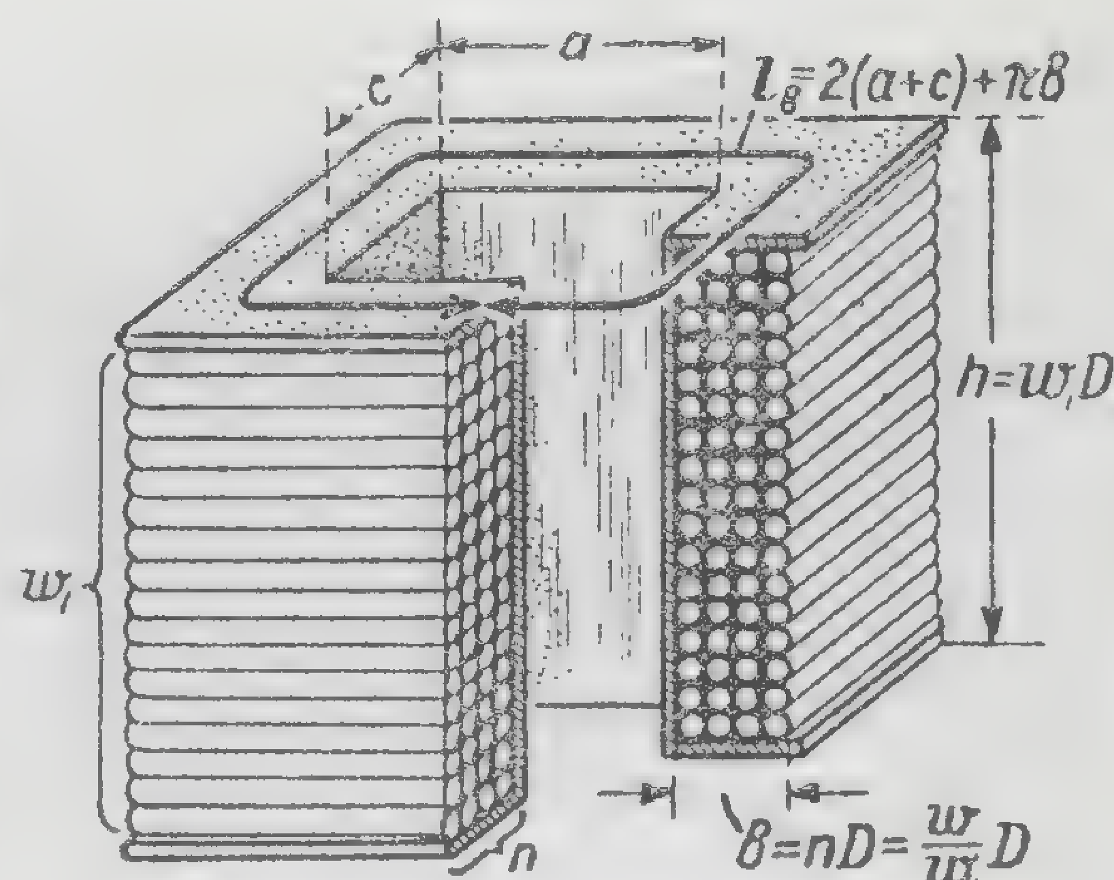
Разветвленная цепь двухполюсной машины

РАСЧЕТ СИММЕТРИЧНОЙ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПРОИЗВОДЯТ ДЛЯ ОДНОЙ ИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЕТВЕЙ

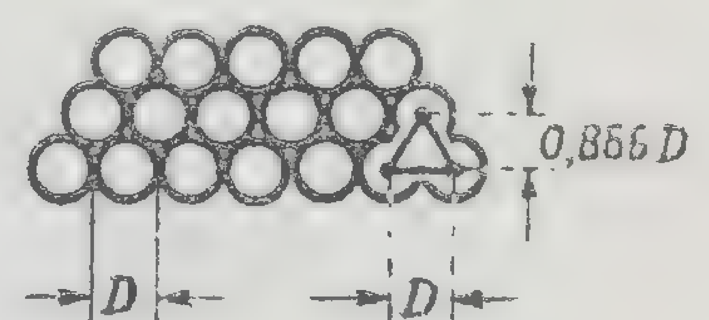


$$K_з = \frac{S_м}{S_{обм}} = \frac{\pi d^2 w}{4 \cdot w\, D^2} = 0{,}782\left(\frac{d}{D}\right)^2$$

Коэффициент заполнения обмотки медью при **ШАГОВОЙ НАМОТКЕ**



обмотка



$$K_з = \frac{0{,}782}{0{,}866}\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 0{,}9\left(\frac{d}{D}\right)^2$$

Коэффициент заполнения обмотки медью при **ШАХМАТНОЙ НАМОТКЕ**

$$l_{пр} = \frac{U}{E} = \frac{U}{\delta}\gamma \quad \text{м}$$

Длина обмоточного провода

$$в = \frac{S_{обм}}{h} = \frac{S_м}{h \cdot K_з} = \frac{Iw}{\delta \cdot K_з h} \quad \text{мм}$$

Толщина обмотки

$$w = \frac{l_{пр}}{l_в} = \frac{l_{пр}}{2(a+c) + \pi в} \quad \text{витков}$$

Общее число витков

$$S_{пр} = \frac{I}{\delta} = \frac{Iw}{w \cdot \delta} \quad \text{мм}^2$$

Сечение обмоточного провода

$Iw = 4000\,а$; $U = \frac{110}{2} = 55\,в$; $h = 15\,см$; $a = 10{,}5\,см$; $c = 12{,}5\,см$ (ср. табл 15); $\gamma = 57 \frac{ом \cdot мм^2}{м}$.

Задаваясь плотностью тока $\delta = 3 \frac{а}{мм^2}$ и коэффициентом заполнения обмотки $K_з = 0{,}5$ (шаговая намотка), получают:

$l_{пров} = \frac{U}{\delta}\gamma = \frac{55 \cdot 57}{3} = 1045\,м$; $S_{обм} = \frac{S_м}{K_з} = \frac{Iw}{\delta \cdot K_з} = 26{,}7\,см^2$; $в = \frac{S_{обм}}{h} = 1{,}78\,см$; $l_в = 2(a+c) + \pi в = 0{,}516\,м$; $w = \frac{l_{пр}}{l_в} = 2020$ витков;

$I = \frac{Iw}{w} = 1{,}98\,а$; $S_{пров} = \frac{I}{\delta} = 0{,}66\,мм^2$. По стандарту: $S_{пров} = 0{,}679\,мм^2$; $d = 0{,}93\,мм$; $D = 0{,}93 + 0{,}12 = 1{,}05\,мм$ (ПБО).

Уточнение δ и $K_з$: $w_1 = \frac{h}{D} = 143$ витка; $n = \frac{w}{w_1} = 14$ слоев; $в = nD = 1{,}48\,см$; $l_в = 2(a+c) + \pi в = 0{,}5065\,м$; $l_{пр} = l_в \cdot w = 1023\,м$;

$\delta = \frac{U}{l_{пр}}\gamma = 3{,}08 \frac{а}{мм^2}$; $I = \delta S = 2{,}1\,а$; $P = UI = 115\,вт$; $K_з = \frac{w \cdot S_{пр}}{h \cdot в} = 0{,}6$

Пример

РАСЧЕТ ОБМОТКИ

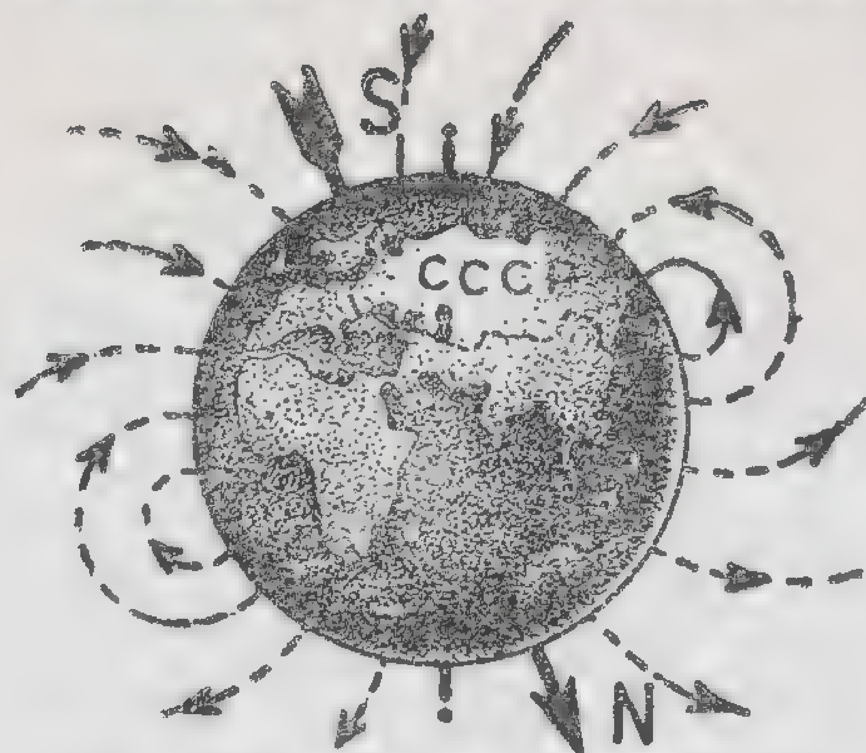
Э. И. Расовский

Худ. А. Меньшиков

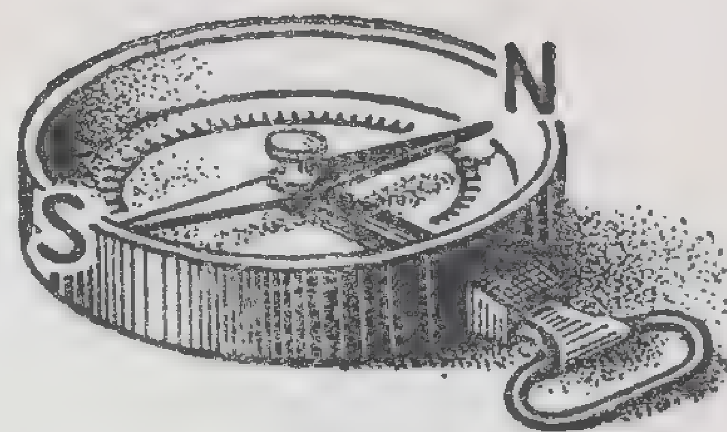
ПОСТОЯННЫЕ МАГНИТЫ



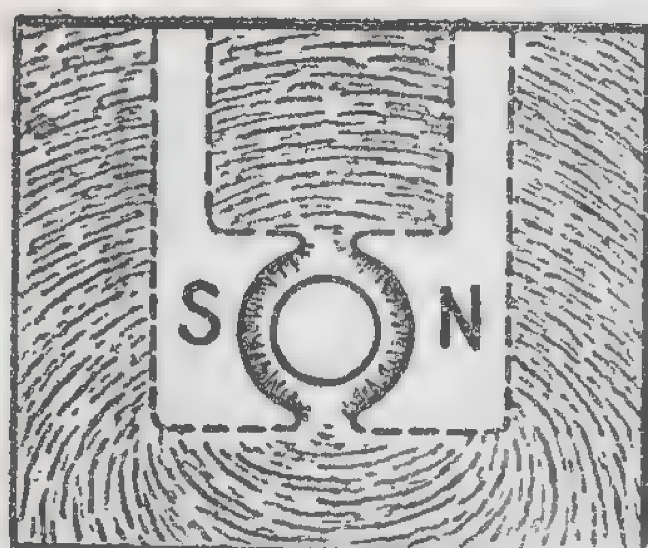
Магнитный железняк



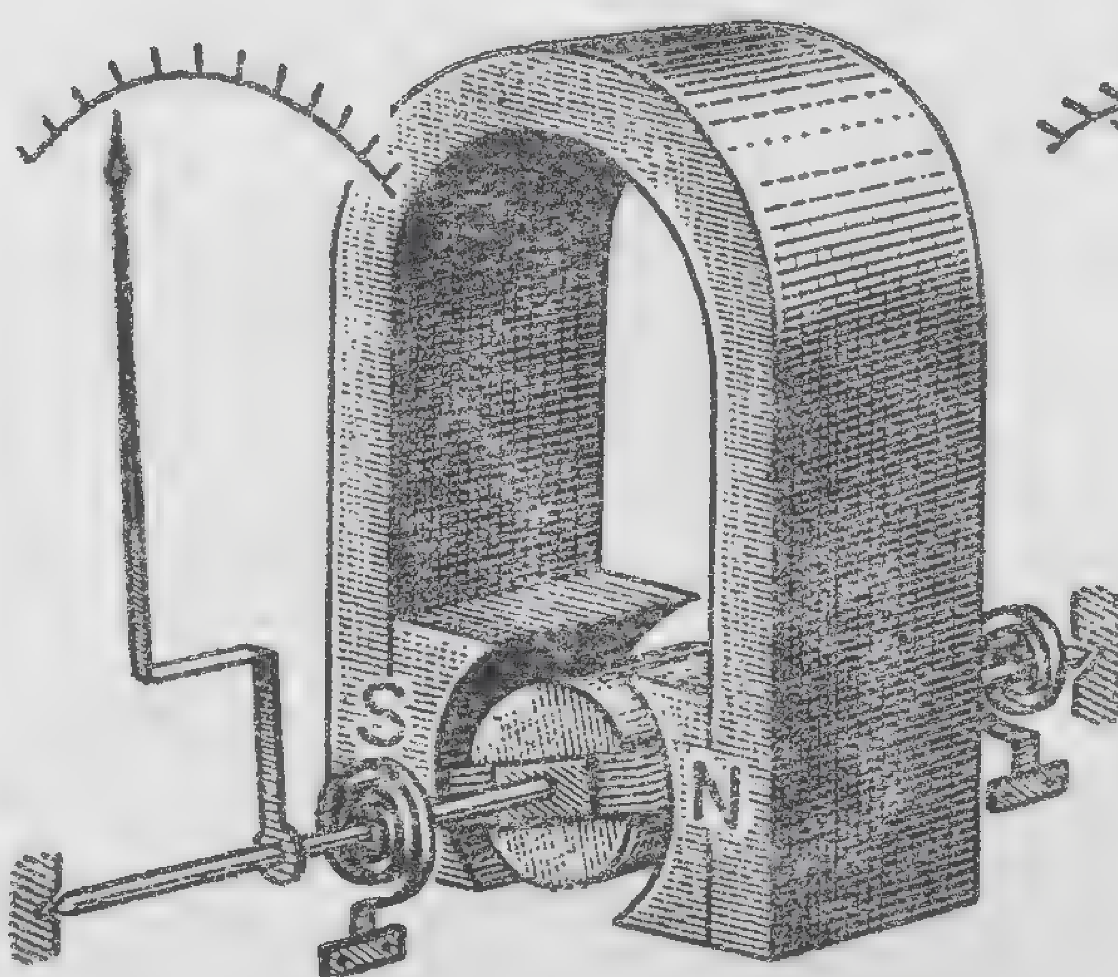
Магнитное поле земли

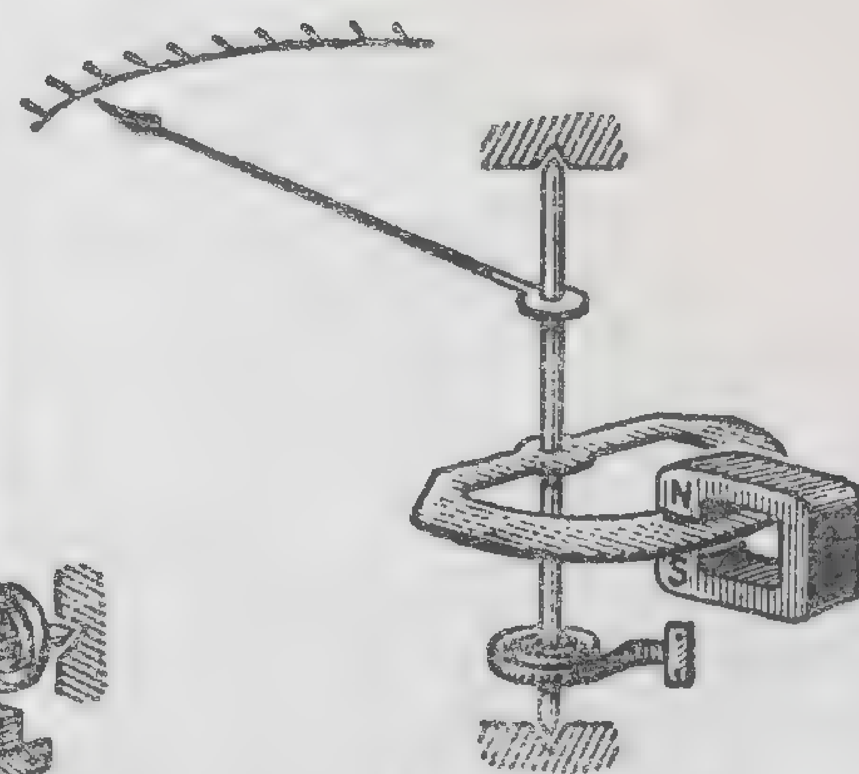


Компас



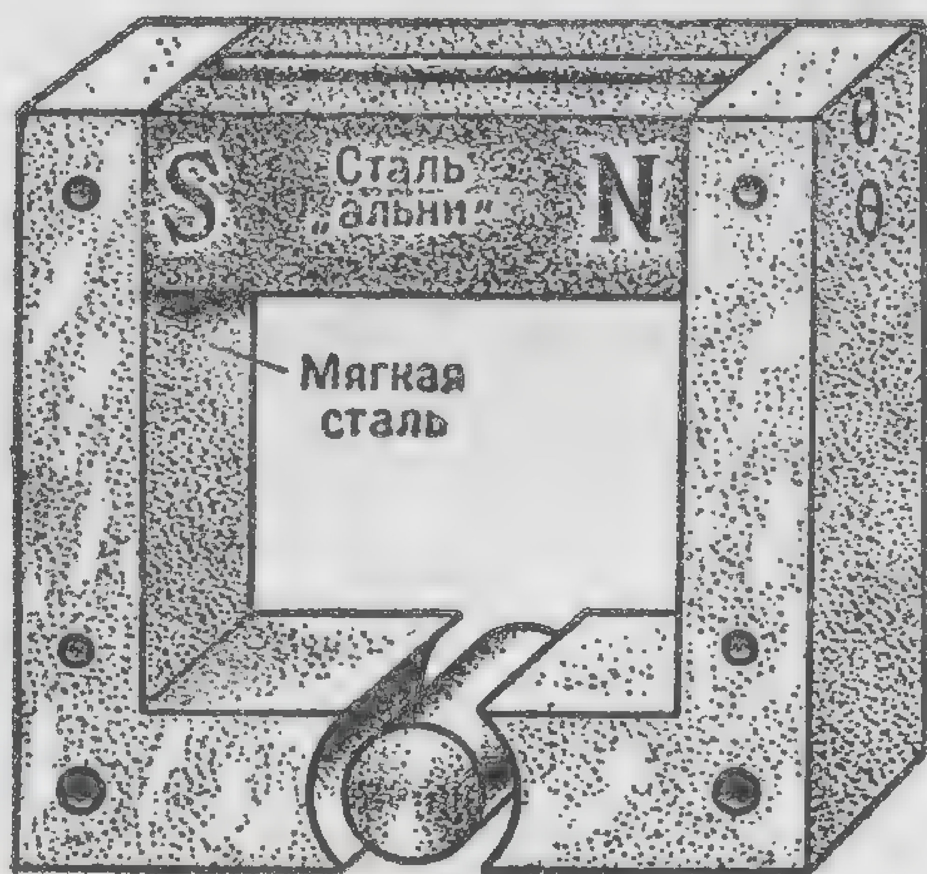
Спектр подковообразного магнита

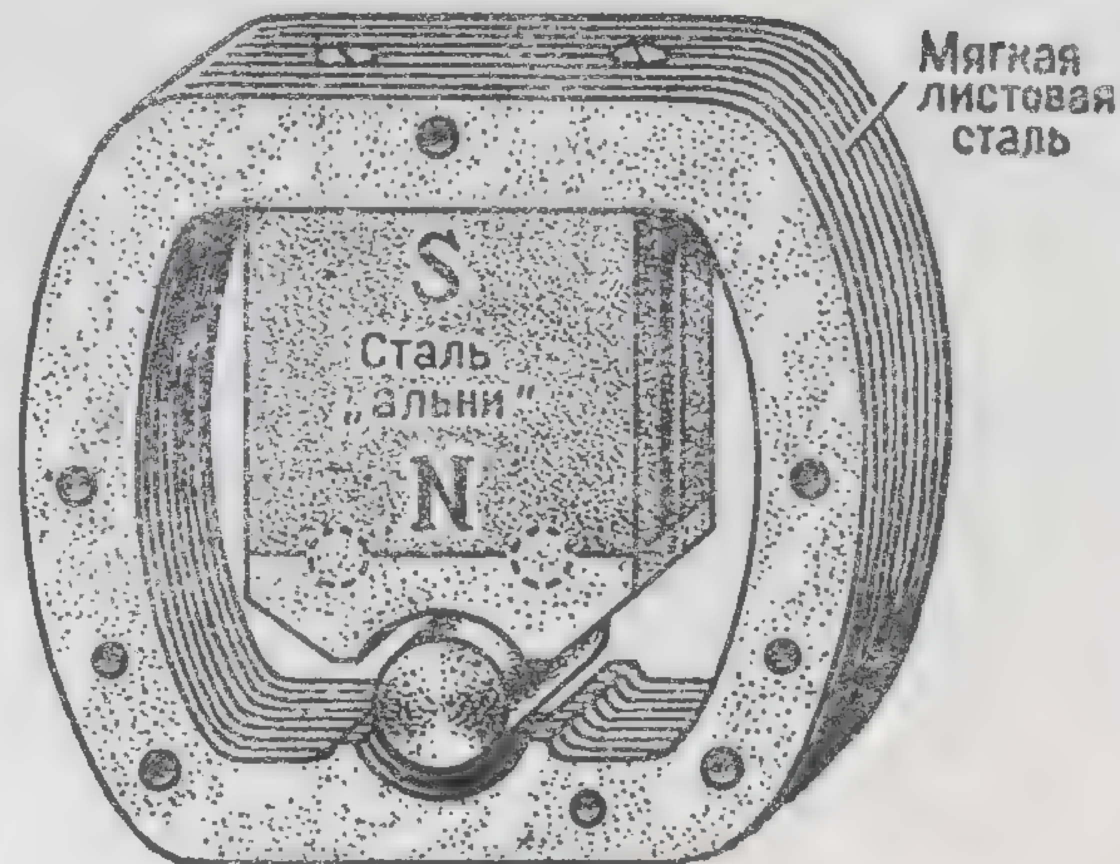




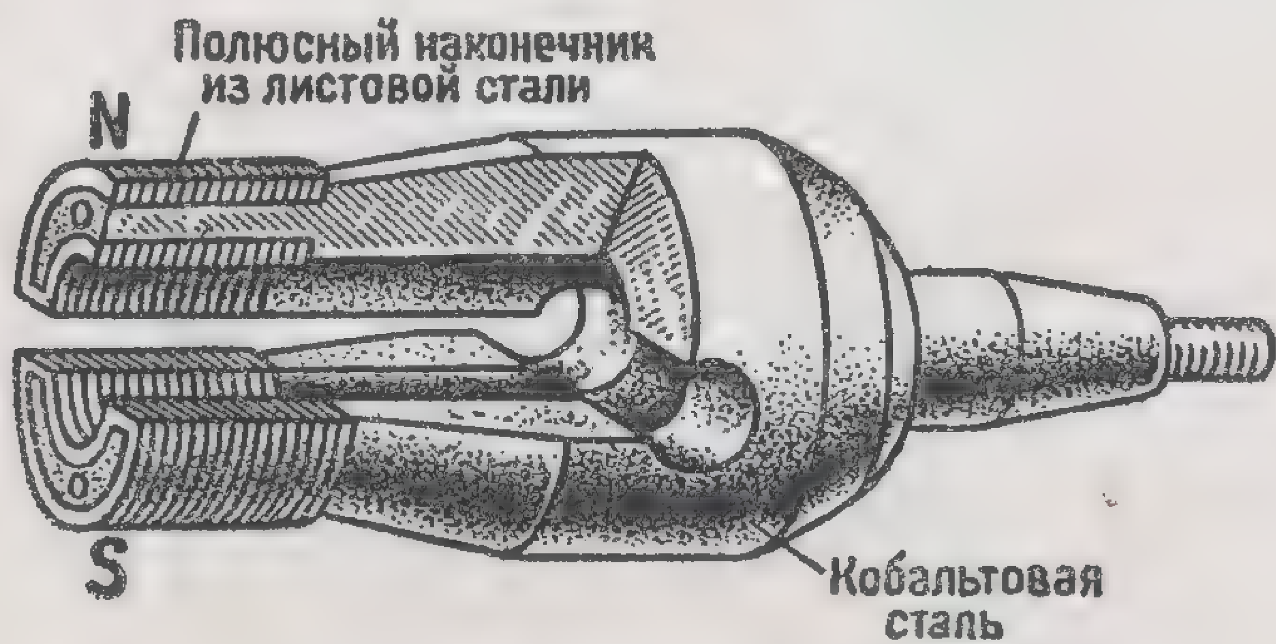
Магнитное успокоение

Магнитоэлектрический измерительный прибор с подковообразным магнитом из хромистой стали

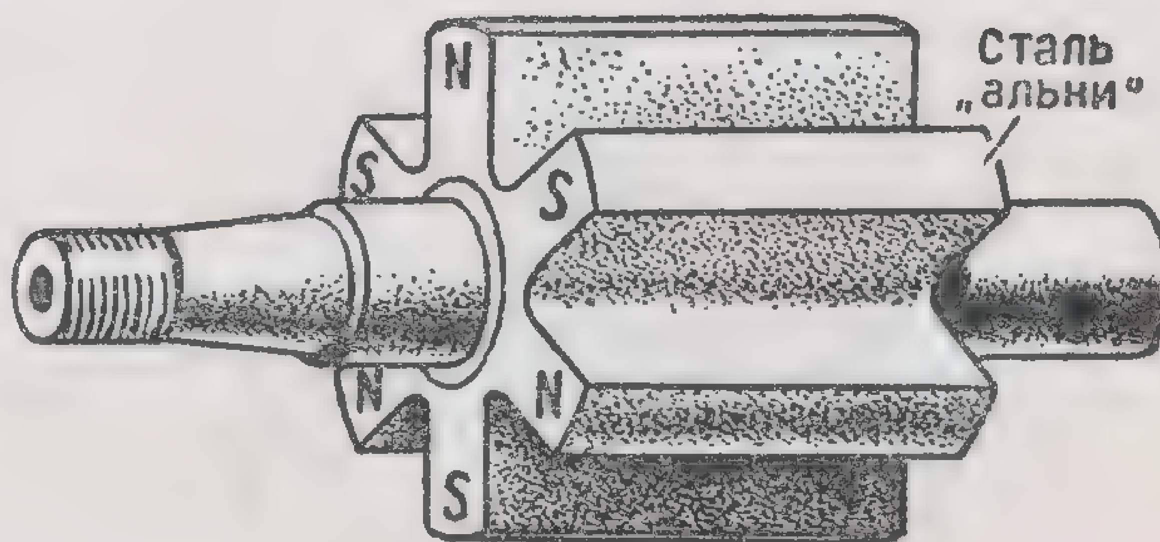




Магнитные системы магнитоэлектрических приборов с коротким магнитом



Двухполюсный ротор тракторного магнето СС-4



Шестиполюсный ротор от тракторного генератора переменного тока Г-30 на 60 *вт*

Э.И. Расовский

Худ А Меньшиков

РАСЧЕТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ



Намагниченное стальное кольцо

Размагничение замкнутого магнита отрицательным током

Размагничение разомкнутого магнита

$l_в=0{,}25$ см; $\Phi_в=\Phi_{ст}=1{,}4\cdot10^{-4}$ в·сек

Сталь „магнико":

$$\left(\frac{BH}{2}\right)_{макс}=\left(\frac{1{,}1\cdot34500}{2}\right)=19000\ \frac{дж}{м^3};$$

$$l_{ст}=l_в\frac{H_в}{H_{ст}}=0{,}25\frac{0{,}8\cdot10^6\cdot1{,}1}{34500}=6{,}4\ см;$$

$$S_{ст}=\frac{\Phi}{B_м}=1{,}27\ см^2;\ V_{ст}=Sl=8{,}14\ см^3$$

Вольфрамовая сталь:

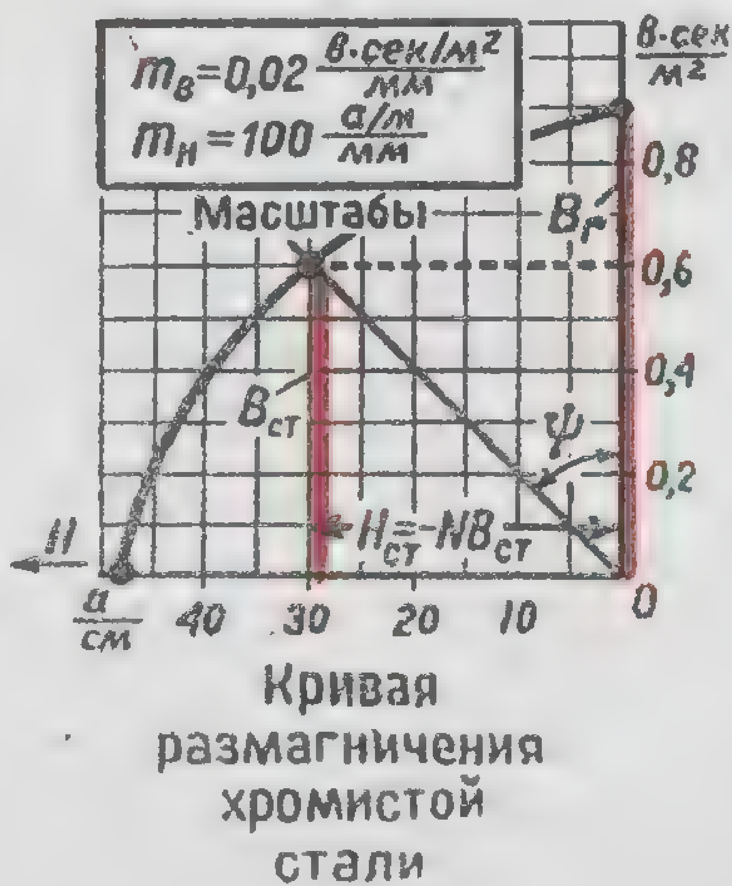
$$\left(\frac{BH}{2}\right)_{макс}=\left(\frac{0{,}64\cdot3670}{2}\right)=1175\ \frac{дж}{м^3};$$

$$l_{ст}=0{,}25\frac{0{,}8\cdot10^6\cdot0{,}64}{3670}=35\ см;$$

$$S_{ст}=\frac{1{,}4\cdot10^{-4}}{0{,}64}=2{,}19\ см^2;\ V_{ст}=76{,}5\ см^3$$

Пример

Определение размеров магнита по заданному магнитному потоку



Кривая размагничивания хромистой стали

$$H_{ст}=-H_в\frac{l_в}{l_{ст}}=-B_{ст}\frac{l_в}{\mu_0 l_{ст}}=-NB_{ст}\quad \frac{а}{м}$$

Напряженность поля в стали

$$N_{ст}=\frac{H_{ст}}{B_{ст}}=tg\,\psi\frac{m_н}{m_в}\quad \frac{а\cdot м}{в\cdot сек}$$

Коэффициент размагничивания

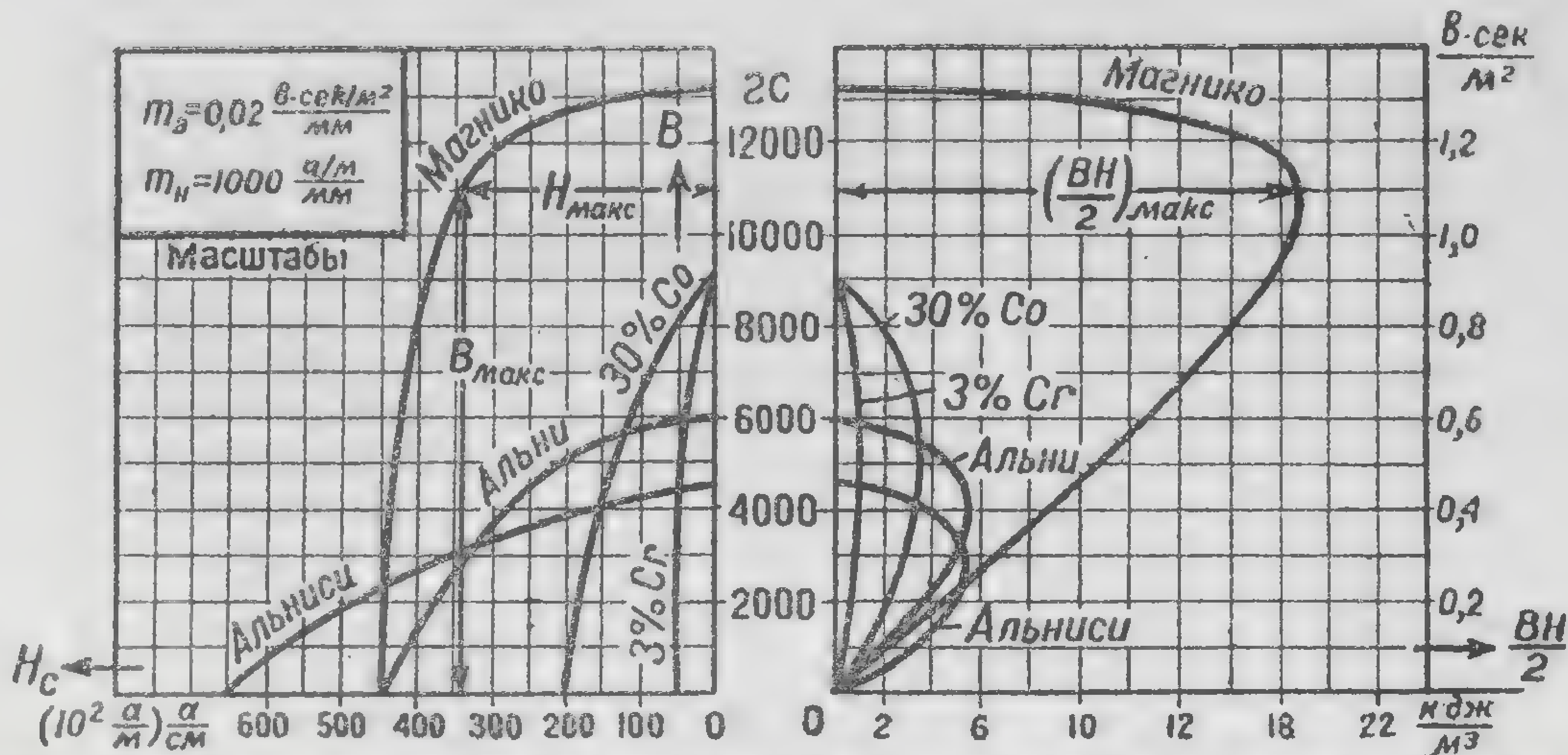
$l_в=0{,}25$ см; $l_{ст}=40$ см; $B_r=0{,}9\ \frac{в\cdot сек}{м^2}$; $H_c=4600\ \frac{а}{м}$ (хромистая сталь, см. кривую).

$N=\frac{l_в}{\mu_0 l_{ст}}=\frac{0{,}25\cdot10^6}{1{,}256\cdot40}=5000$; $tg\psi=N\frac{m_в}{m_н}=1$; $\psi=45°$.

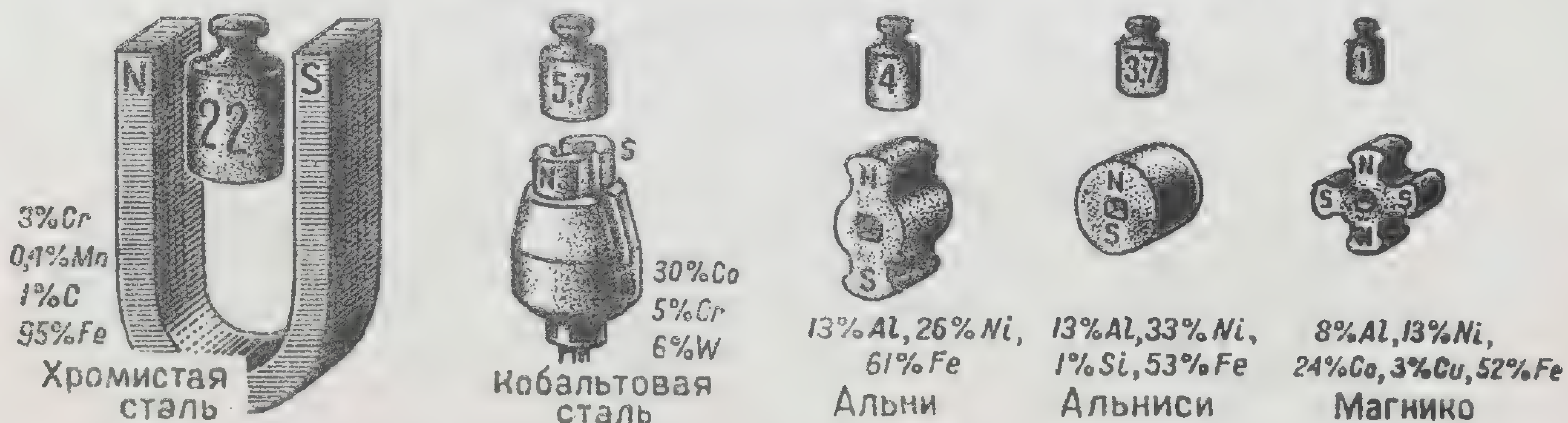
По кривой размагничивания: $B_{ст}=0{,}6\ \frac{в\cdot сек}{м^2}$; $H=30\ \frac{а}{см}$

Пример

Определение магнитной индукции по заданным размерам магнита



Кривые размагничивания и максимальной энергии магнитных сталей



Хромистая сталь

Кобальтовая сталь

13%Al, 26%Ni, 61%Fe Альни

13%Al, 33%Ni, 1%Si, 53%Fe Альниси

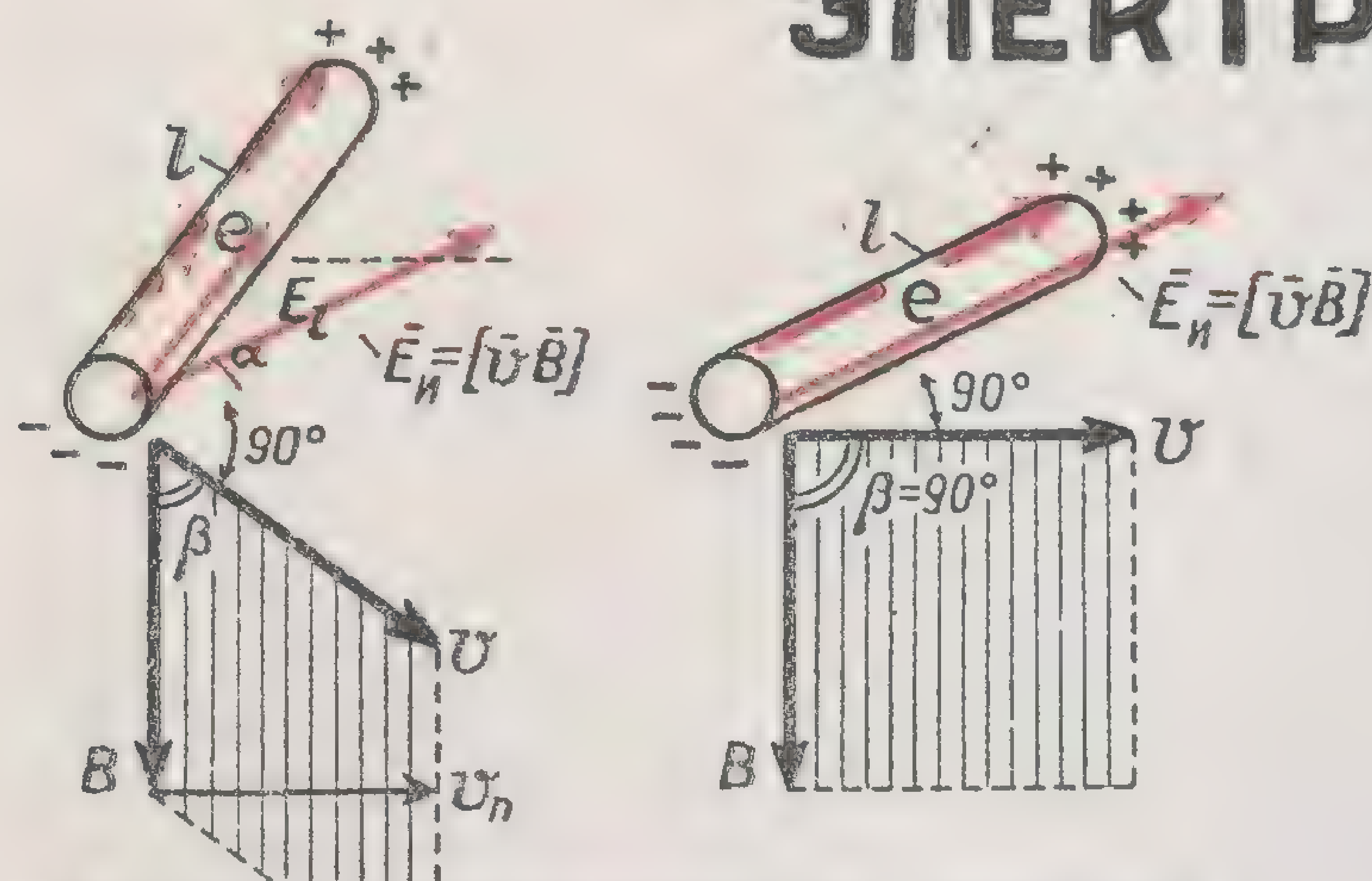
8%Al, 13%Ni, 24%Co, 3%Cu, 52%Fe Магнико

Сравнительный вес постоянных магнитов из различных сплавов

Э И Расовский

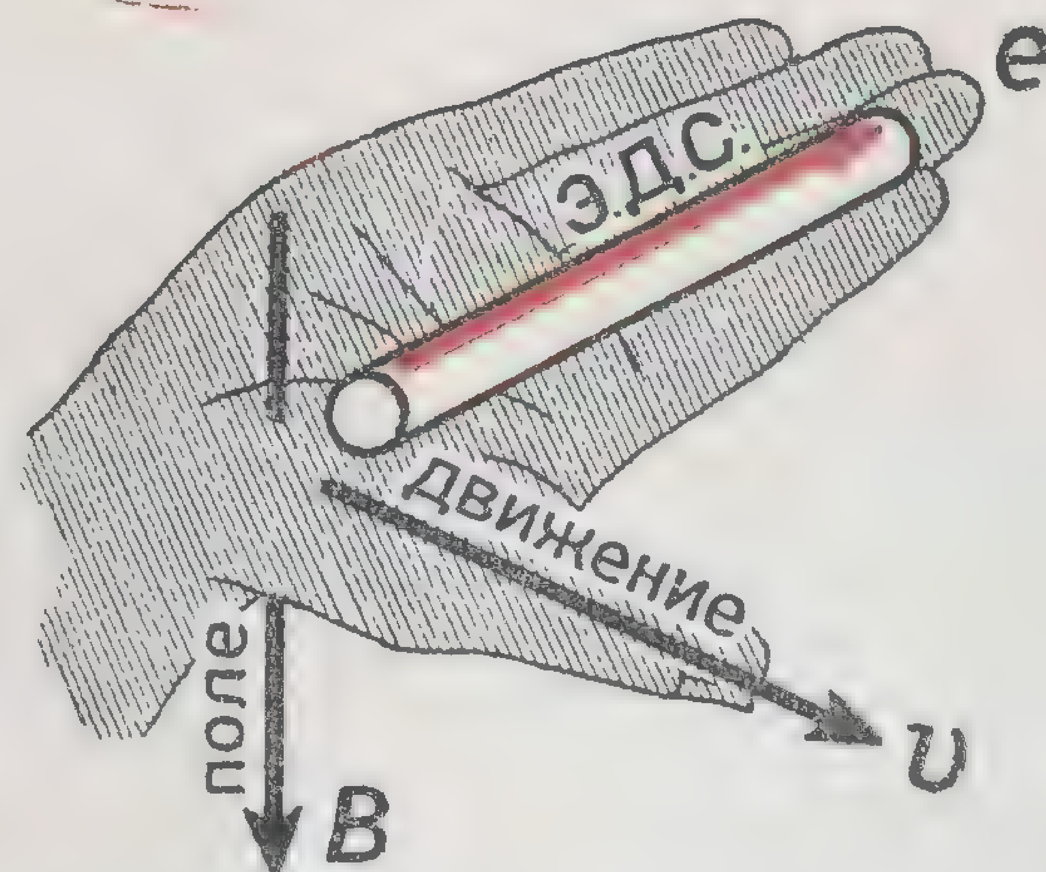
Худ. А. Меньшиков

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

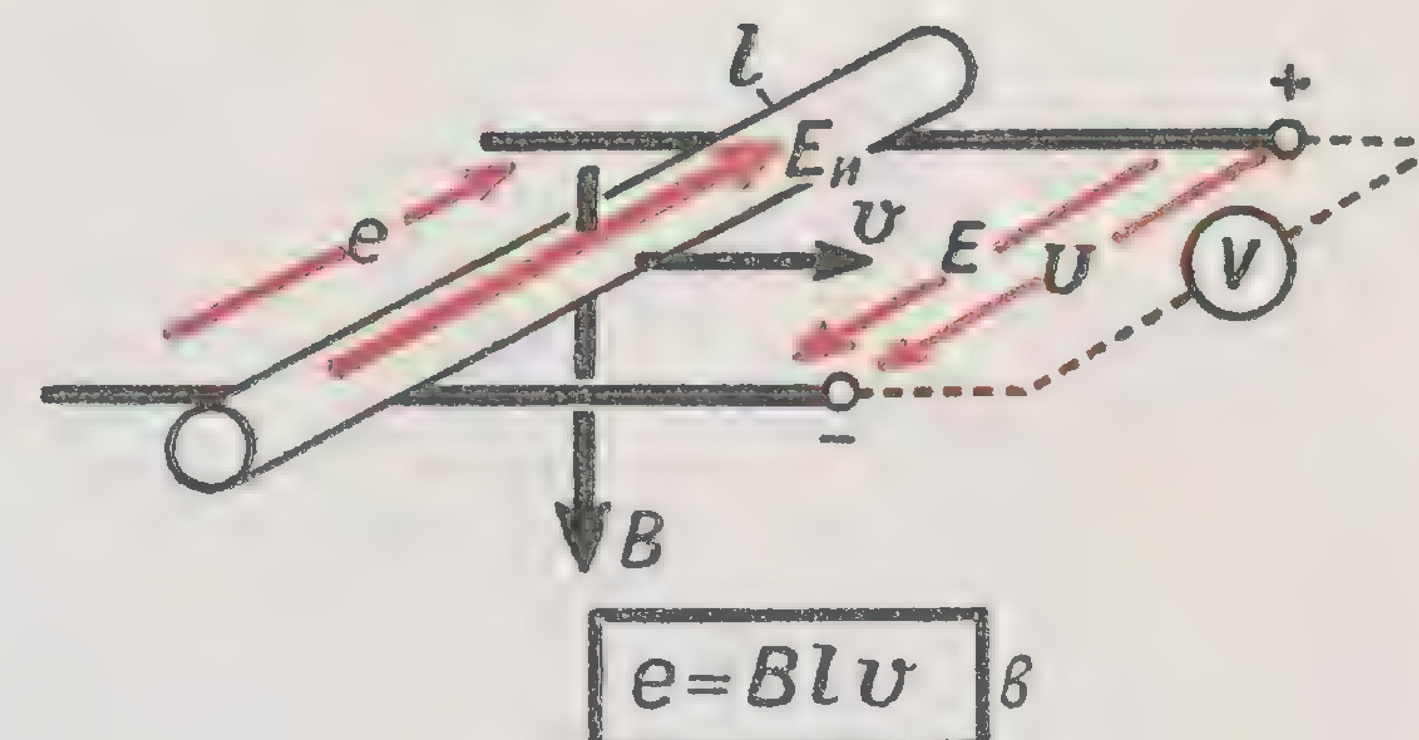


$e=vBSin\beta\cdot l\,Cos\alpha=E_и\,l\,Cos\alpha=E_l\cdot l\,;\ e=[\bar{v}\bar{B}]\bar{l}$ в

Электродвижущая сила (э.д.с.), индуктируемая в отрезке проводника, движущегося в магнитном поле



Определение направления индуктируемой э.д.с. по правилу **ПРАВОЙ РУКИ**

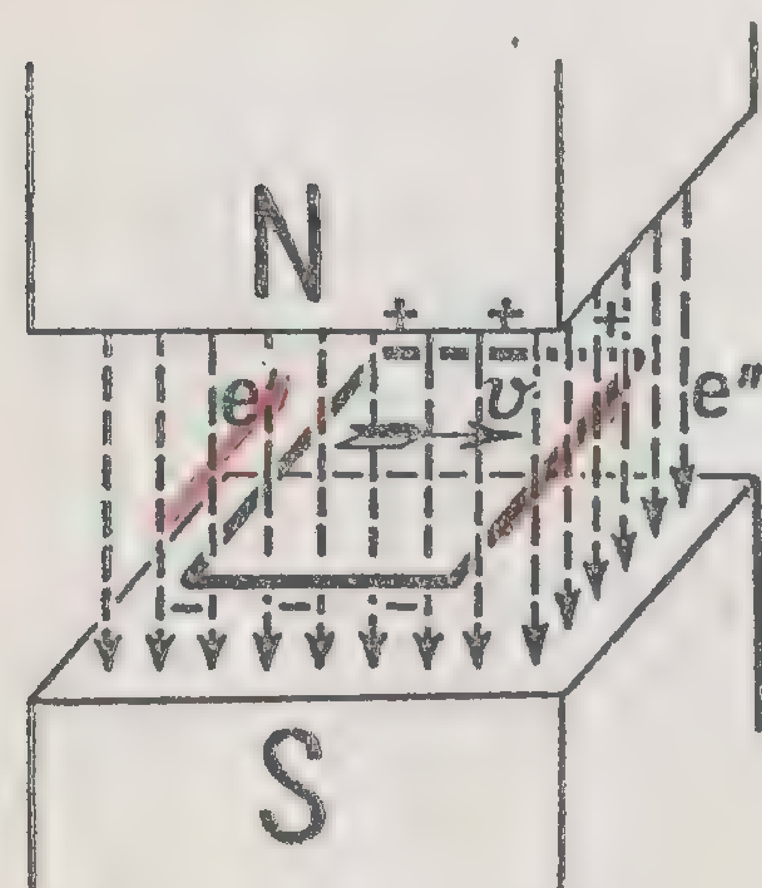


$e=Blv$ в

Индуктируемая э.д.с. ($\beta=90°;\alpha=0$)

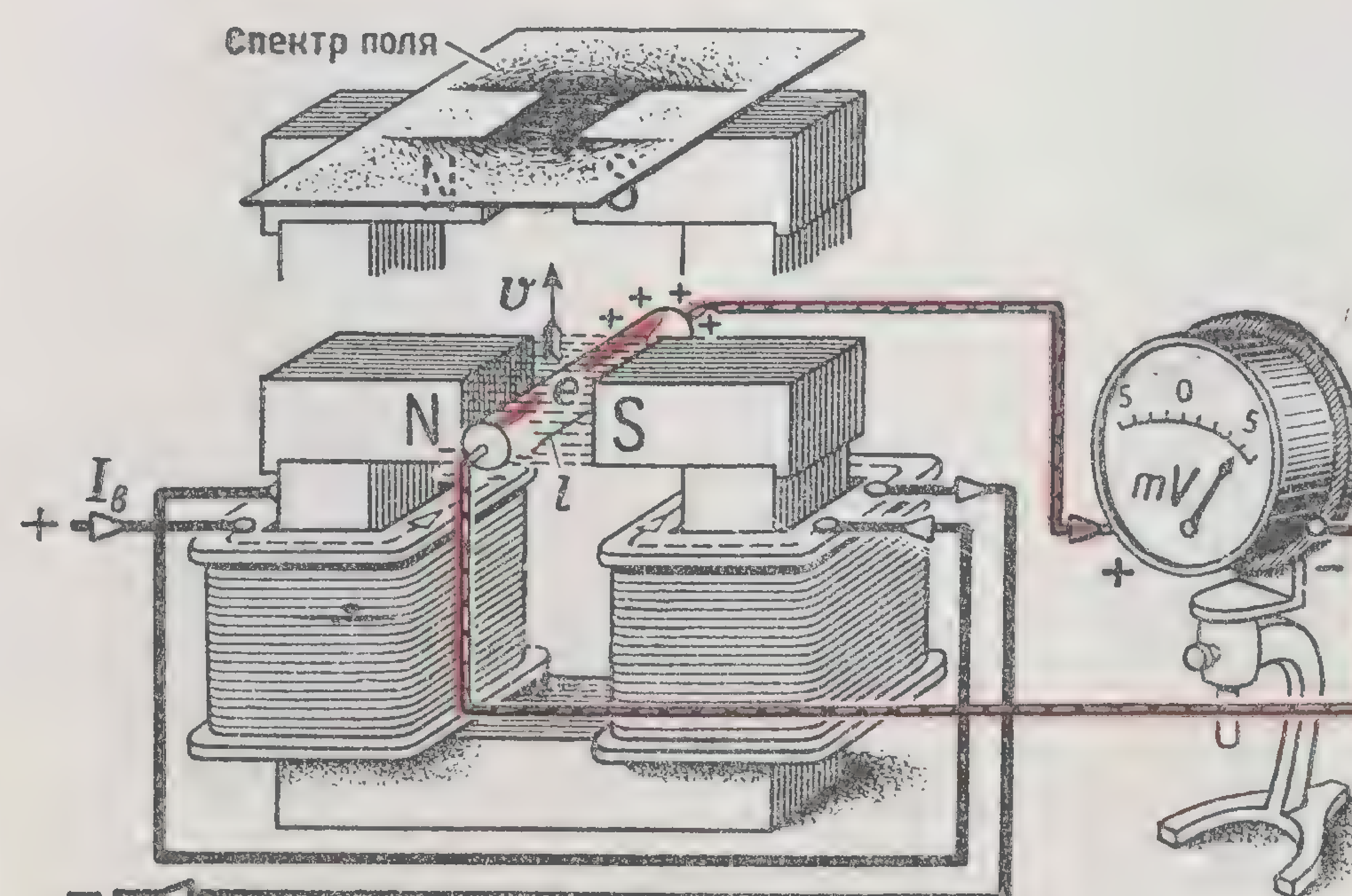
$B=1\,\frac{в\cdot сек}{м^2}\,;\ v=10\,\frac{м}{сек}\,;\ l=0{,}5м\,;\ e=Blv=5в$

Пример



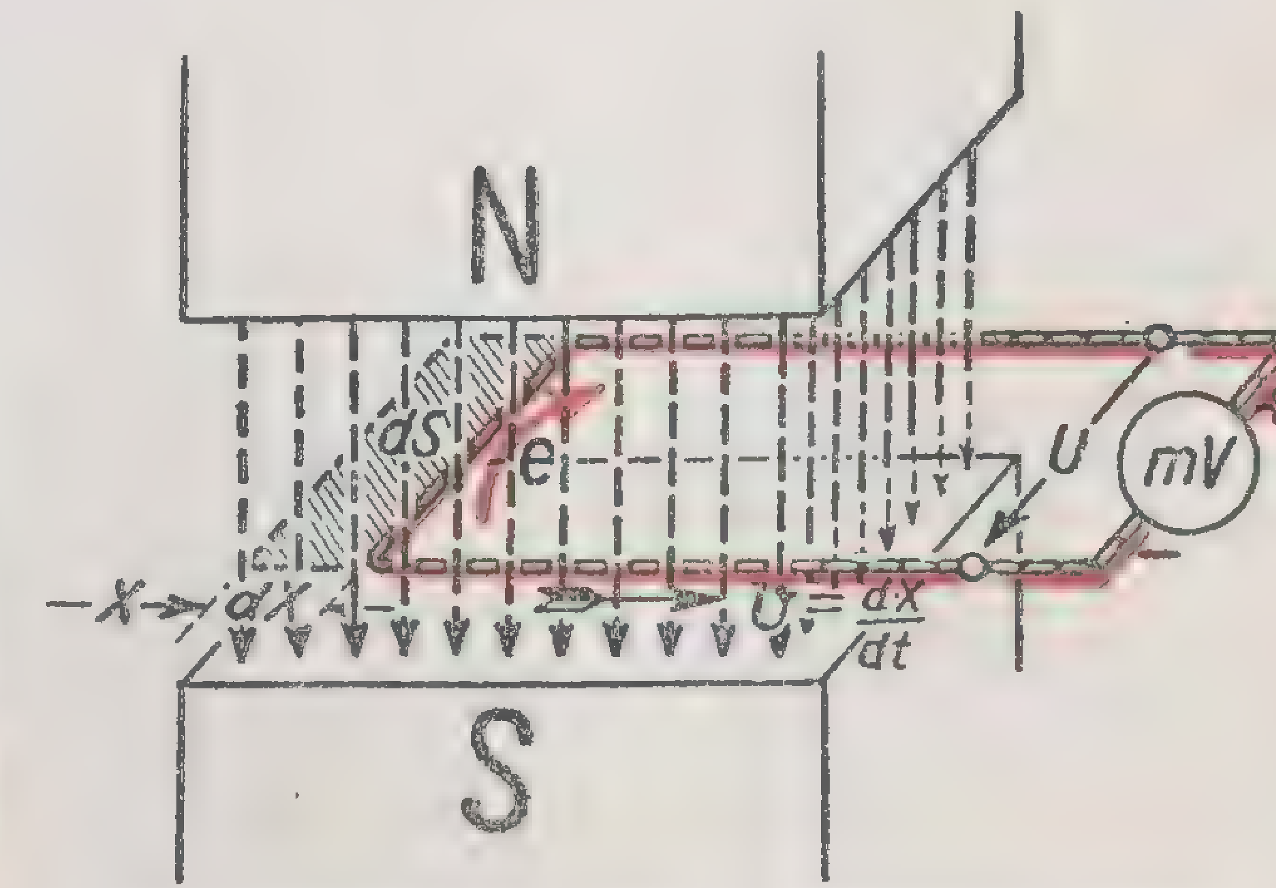
$e'-e''=0$ в

Э.д.с., индуктируемая в движущемся контуре, охватывающем неизменный магнитный поток, равна нулю



Наведение э.д.с. в прямолинейном проводнике

Явление электромагнитной индукции открыто М.Фарадеем в 1831 г.



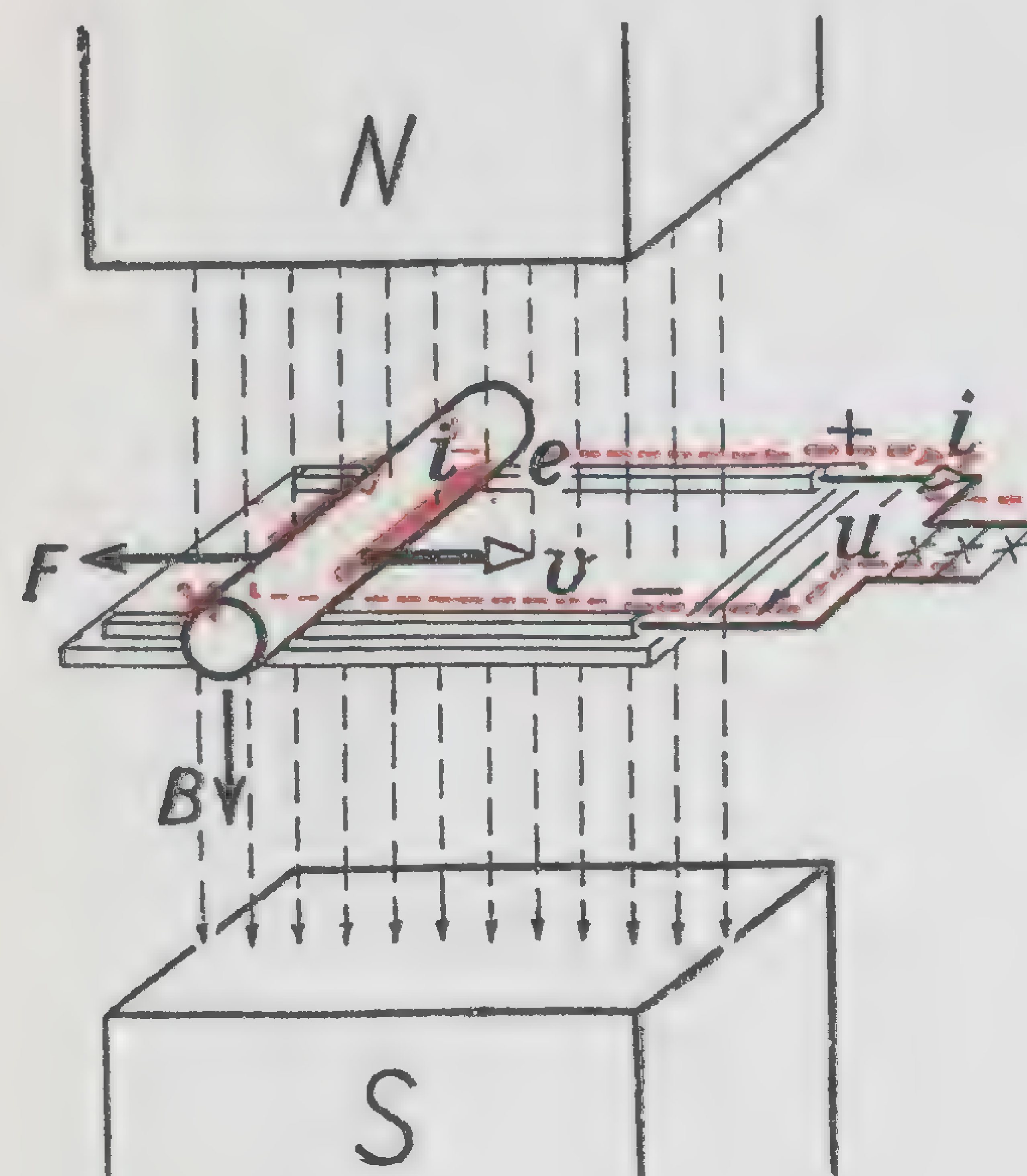
$e=Blv=Bl\frac{dX}{dt}=B\frac{dS}{dt}=\frac{d\Phi}{dt}$ в

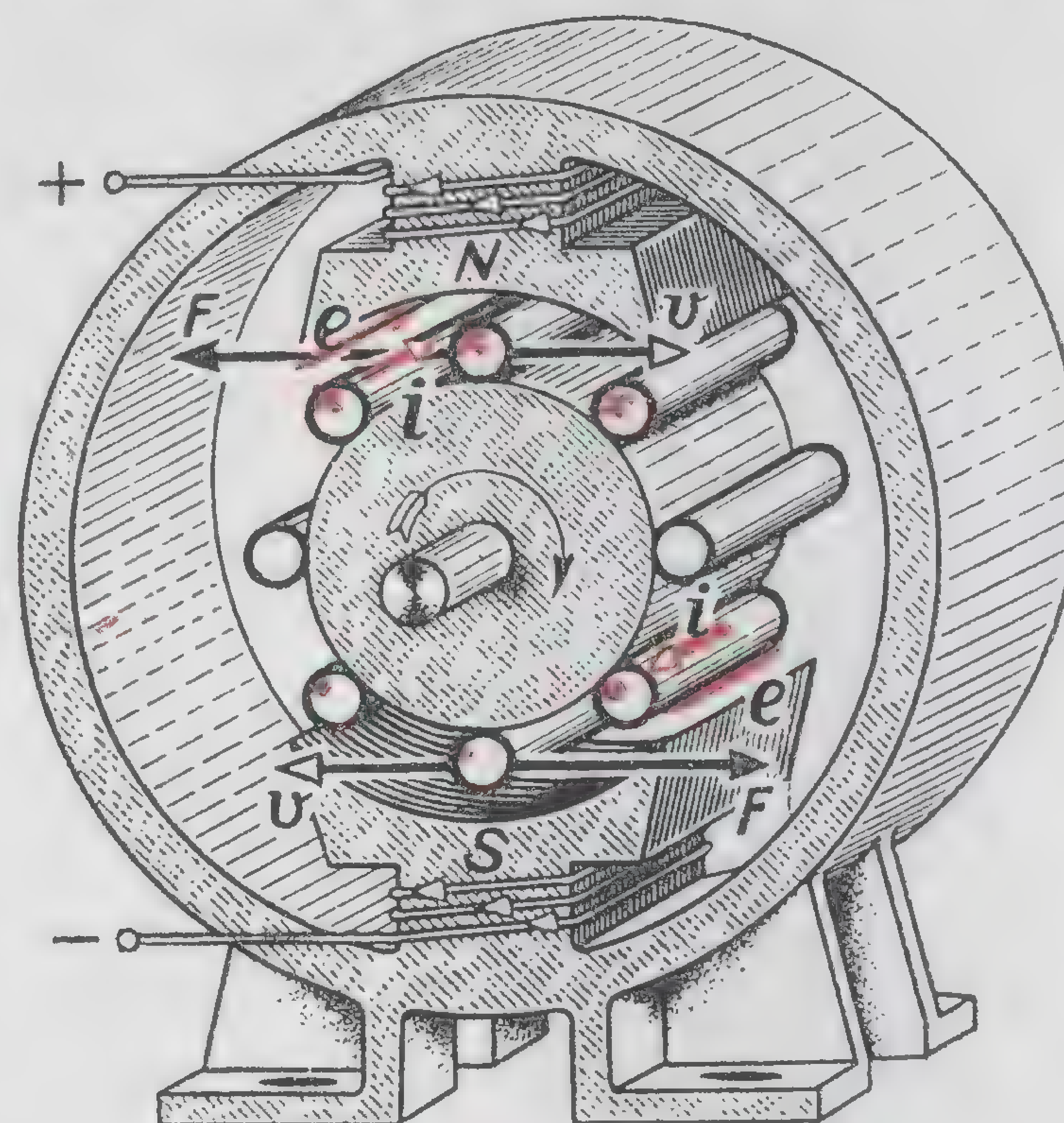
Индуктируемая э.д.с. равна скорости пересечения (изменения) магнитного потока, охватываемого контуром

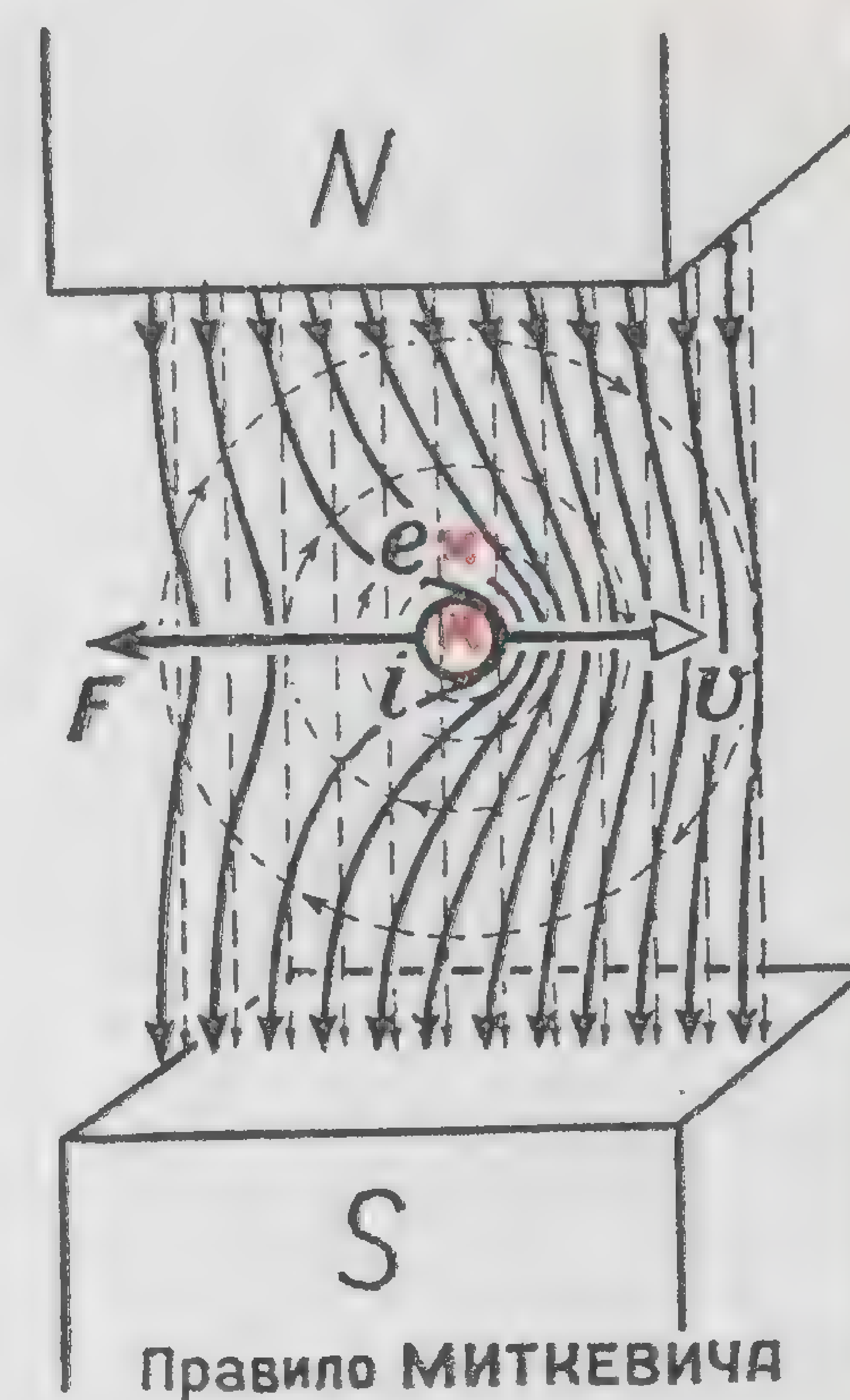
Э.И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

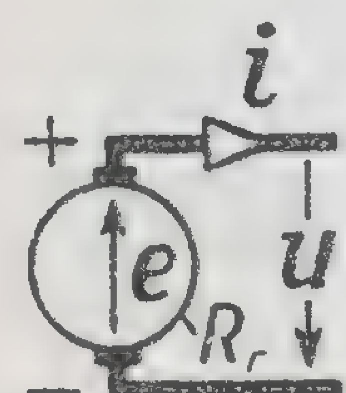
ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ГЕНЕРАТОРЕ





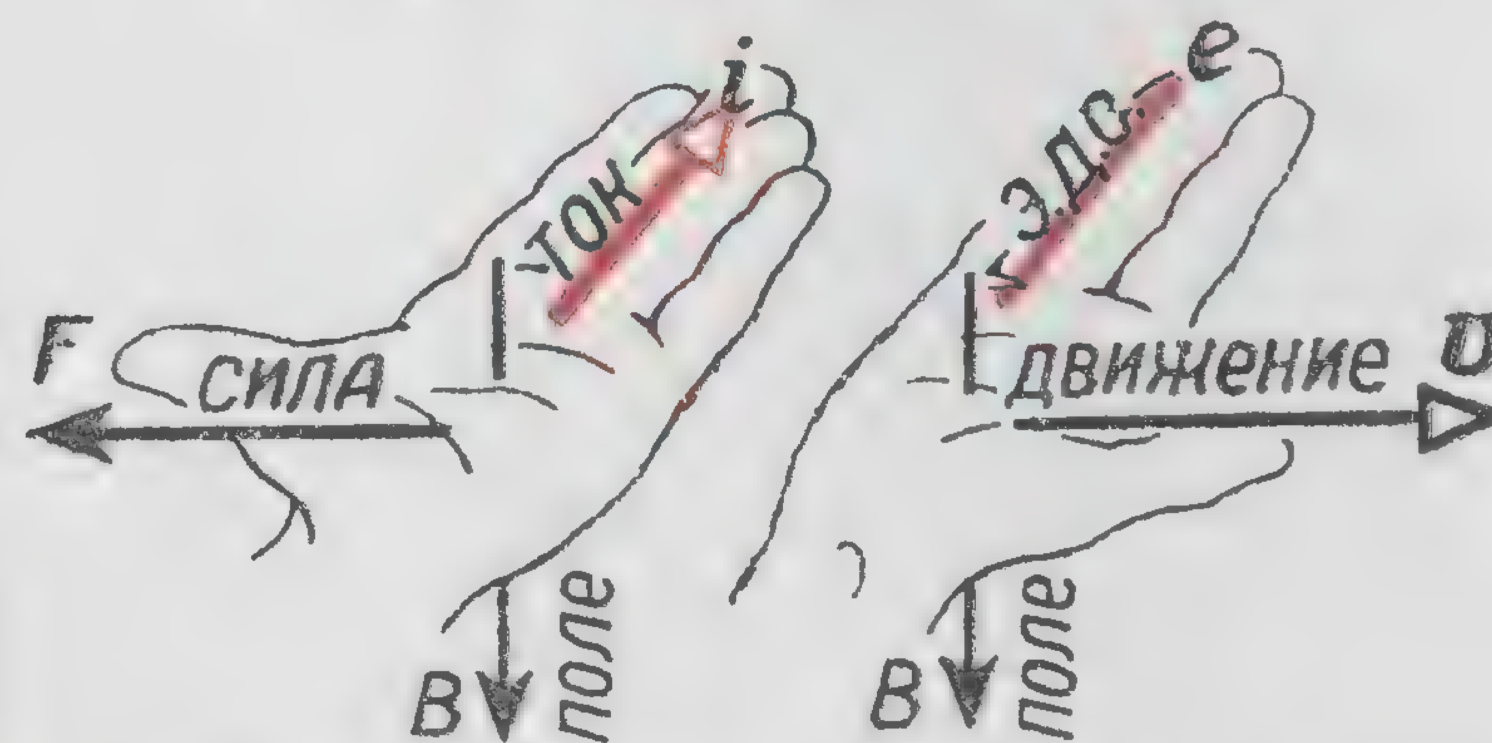


Правило МИТКЕВИЧА



$$u = e_r - iR_r \quad в$$

Напряжение на зажимах генератора меньше развиваемой им э.д.с. на величину падения напряжения в его сопротивлении



Применение правил правой и левой руки к работе генератора

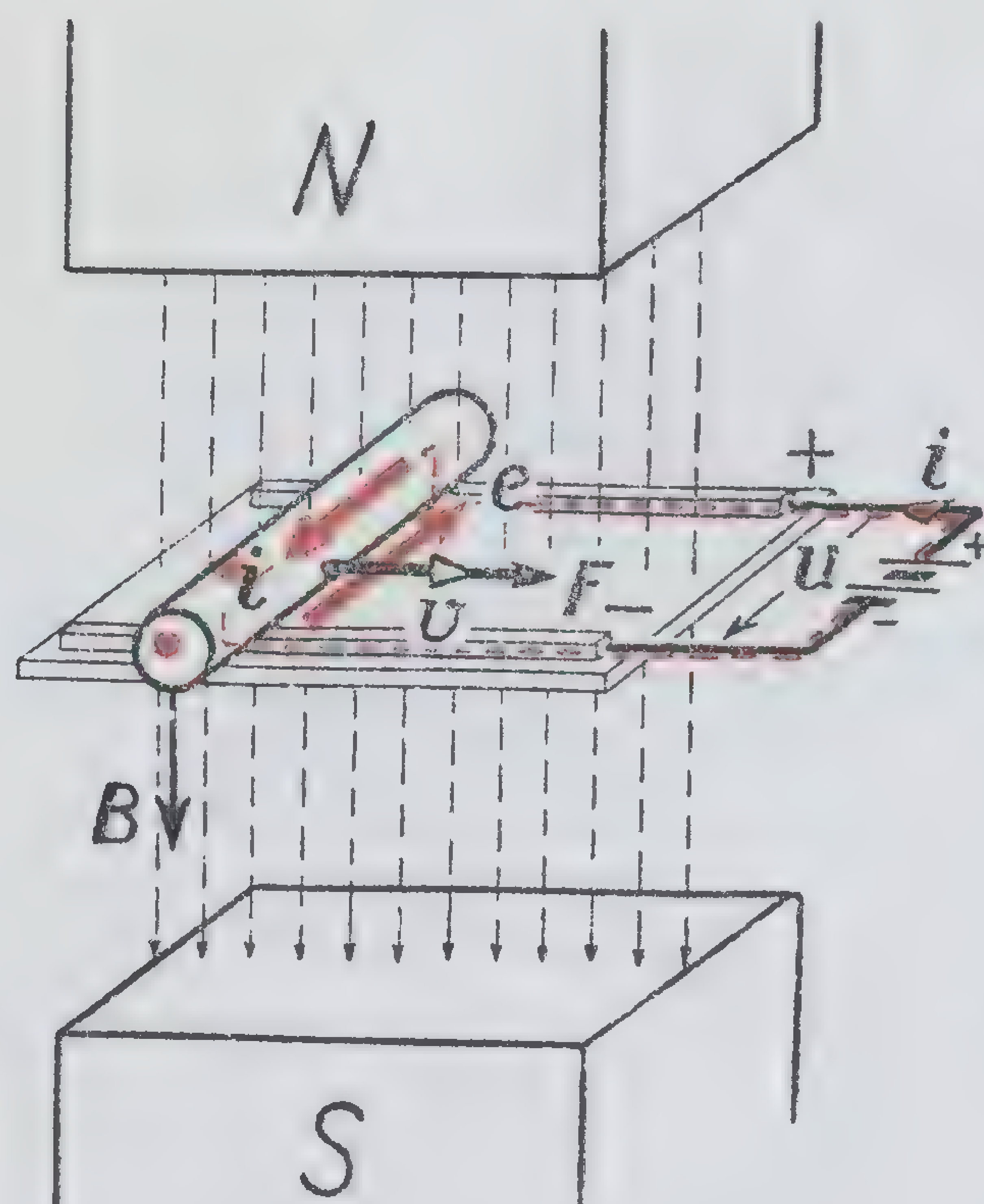
$$P_{эл} = ei = Blv \cdot i = Bli \cdot v = Fv = P_{мех} \quad вт$$

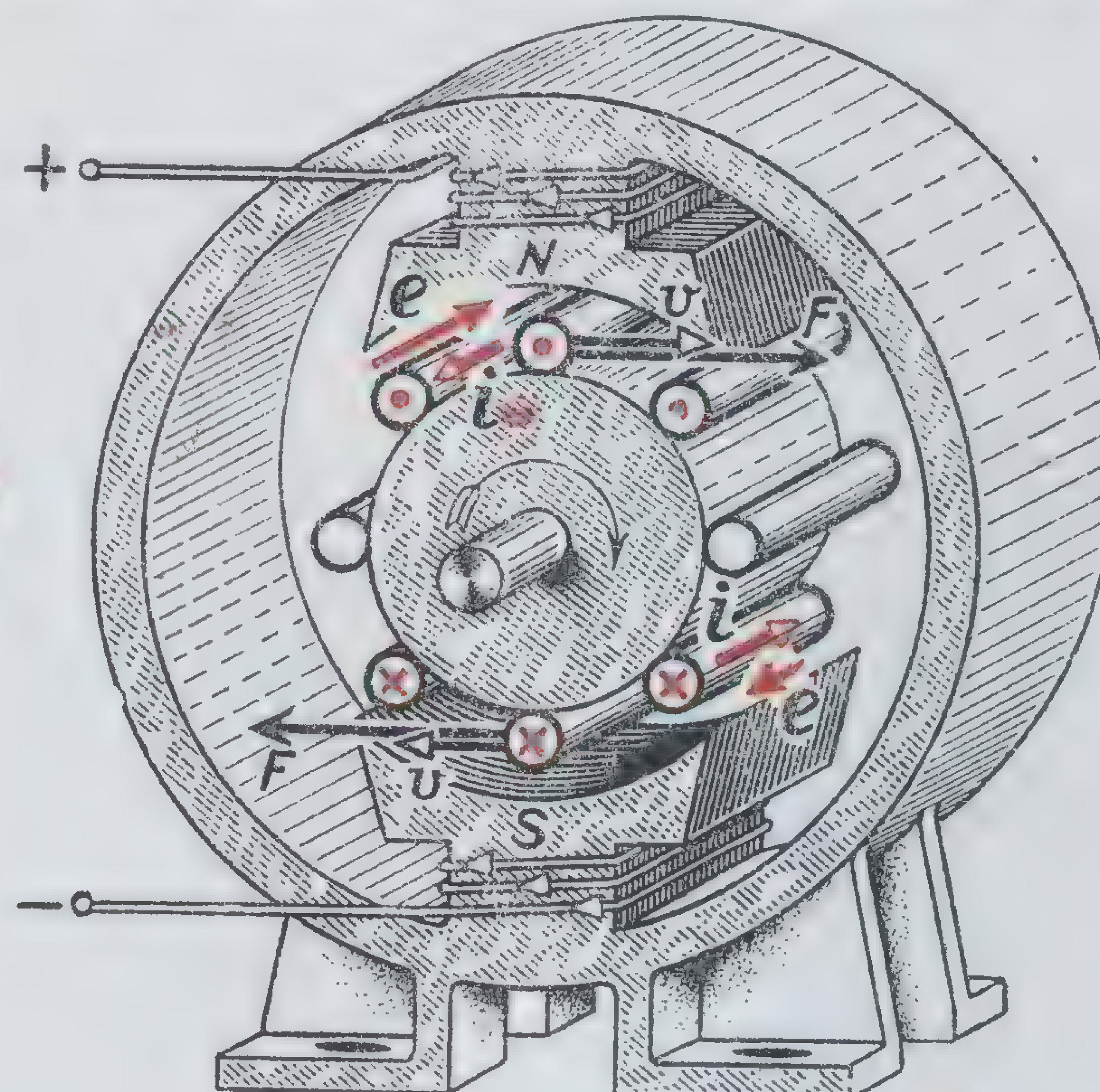
Развиваемая генератором электрическая мощность равна преобразуемой механической мощности

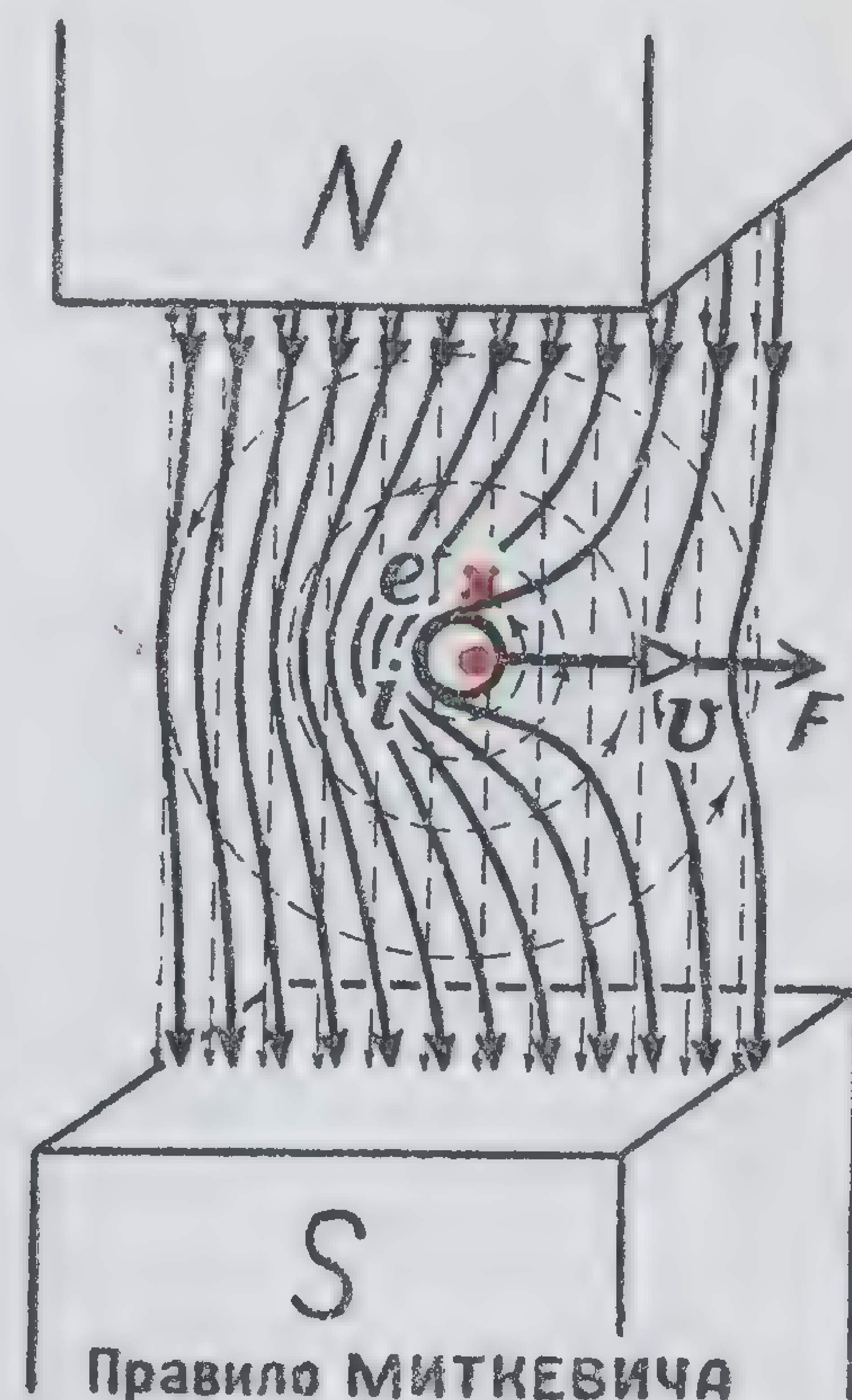
З. И. Расовский.

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ

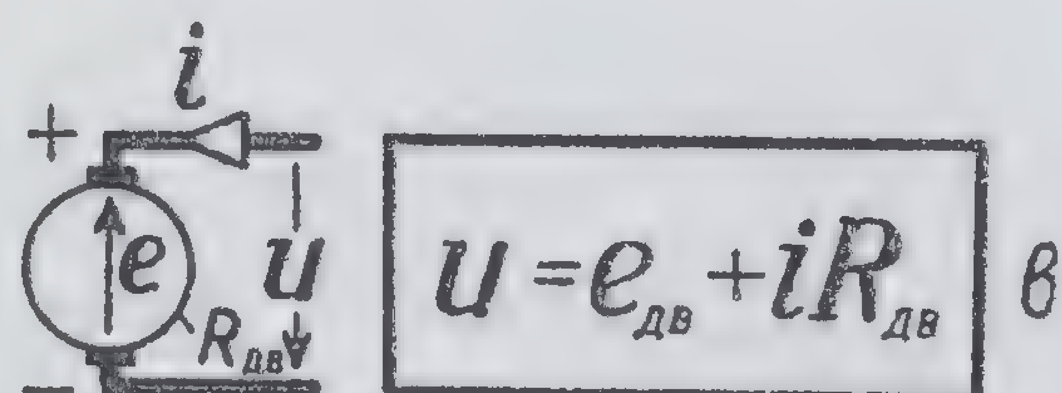
(первый электромагнитный двигатель с вращательным движением построен Б.С.Якоби в 1874 г)





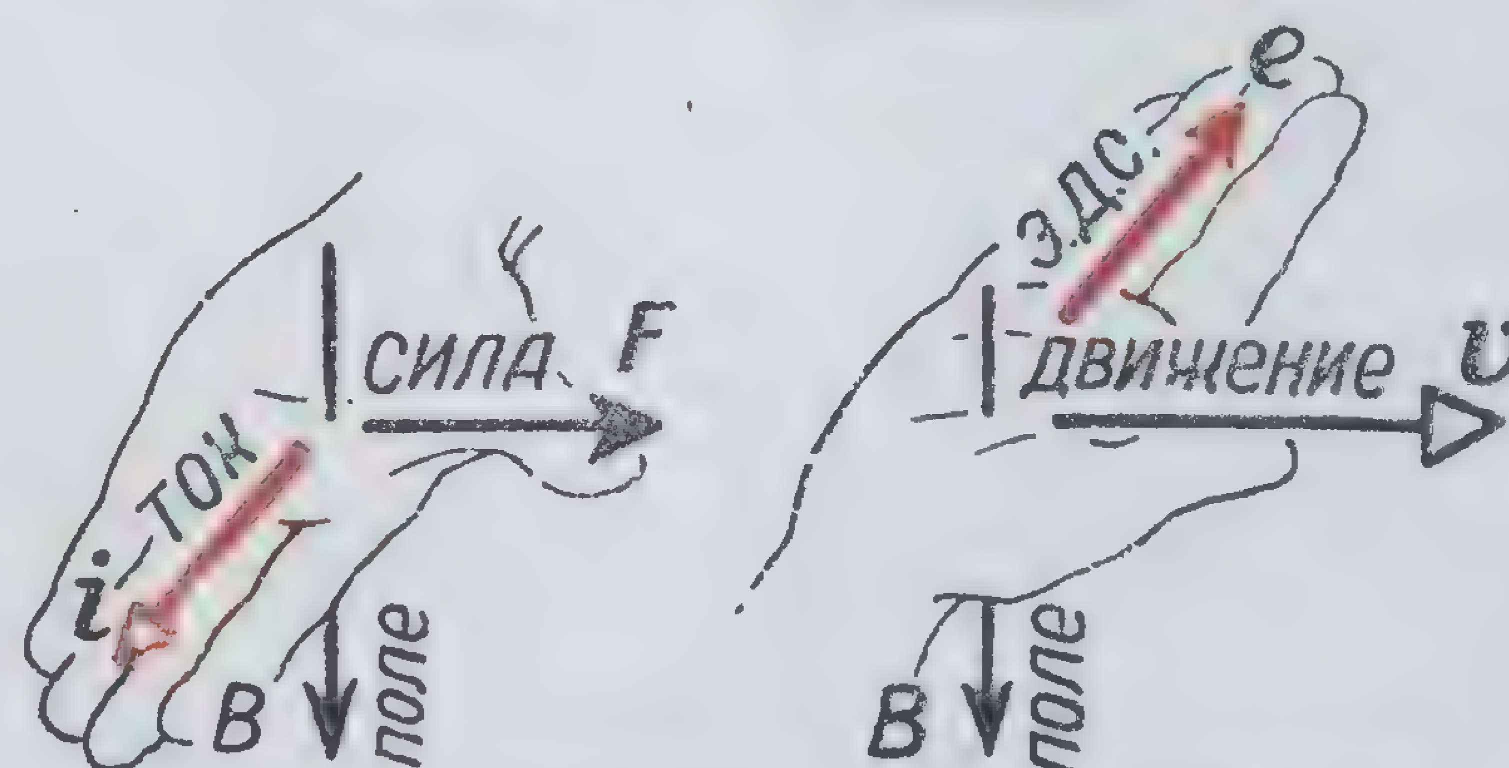


Правило МИТКЕВИЧА



$$u = e_{дв} + iR_{дв} \quad в$$

Напряжение на зажимах двигателя больше его противо-э.д.с. на величину падения напряжения в его сопротивлении



Применение правил правой и левой руки к работе электродвигателя (обращенного генератора)

$$P_{мех} = F\upsilon = Bli \cdot \upsilon = Bl\upsilon \cdot i = ei = P_{эл} \quad вт$$

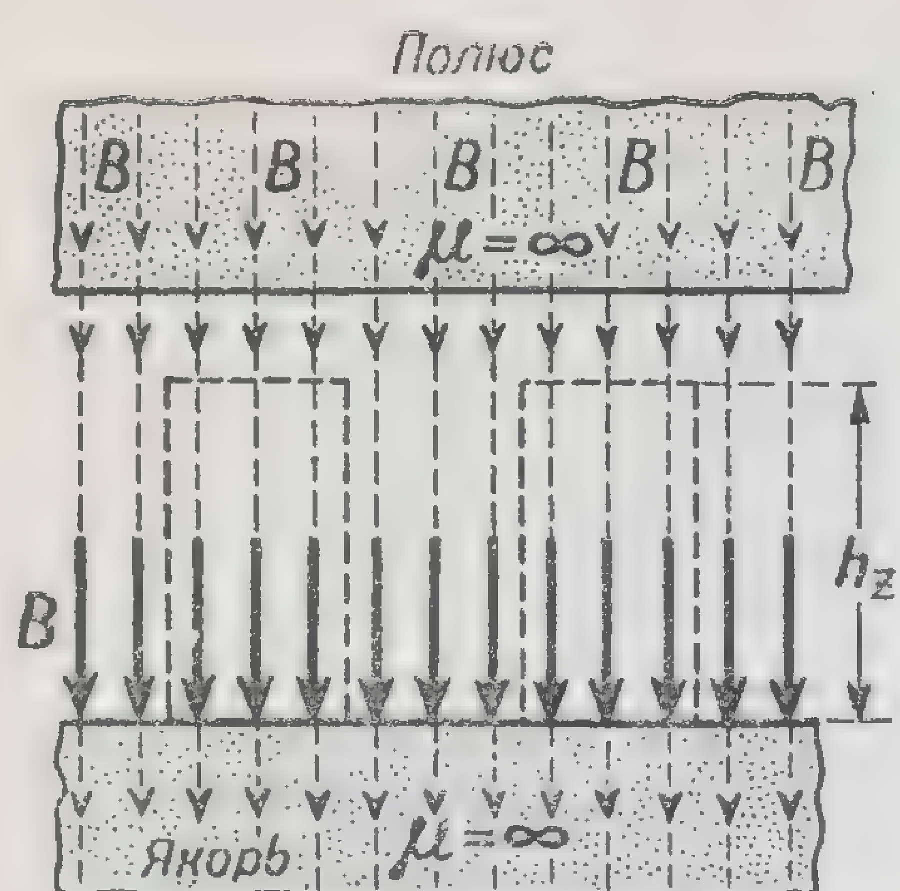
Развиваемая двигателем механическая мощность равна преобразуемой электрической мощности

• Принцип обратимости электрических машин впервые сформулирован Э.Х.Ленцем и Б.С.Якоби •

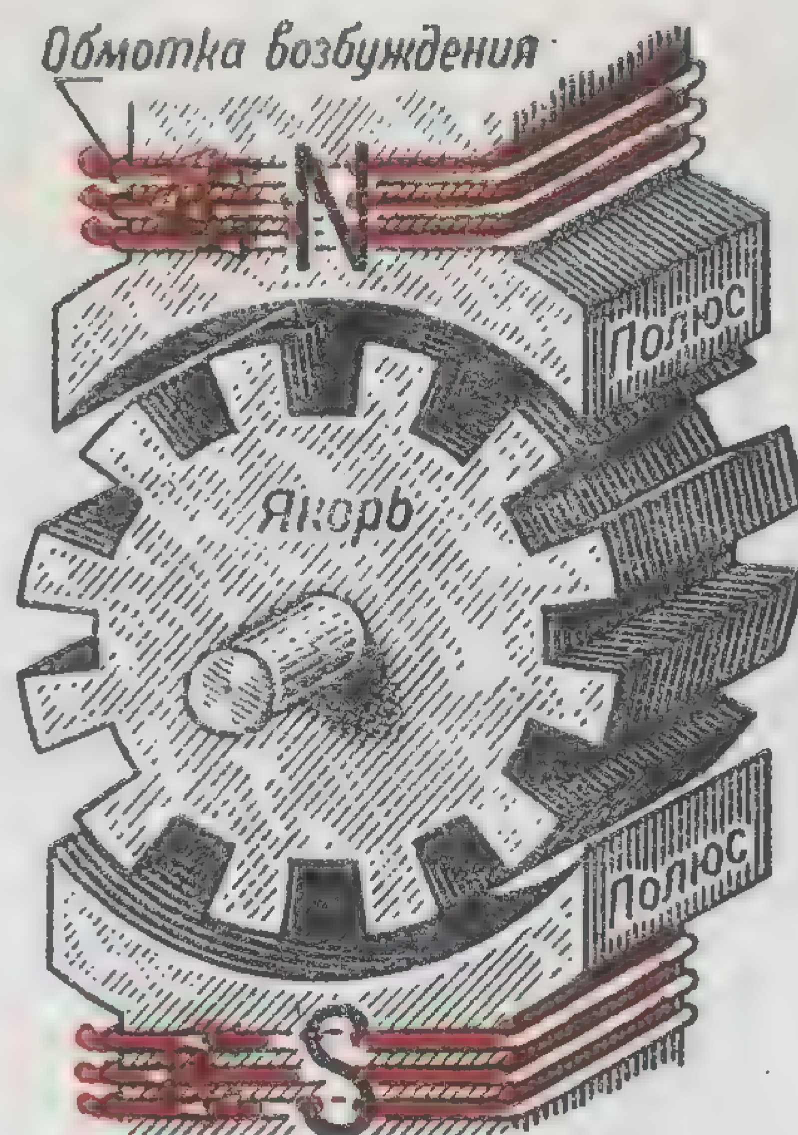
Э. И. Расовский.

Худ А. Меньшиков

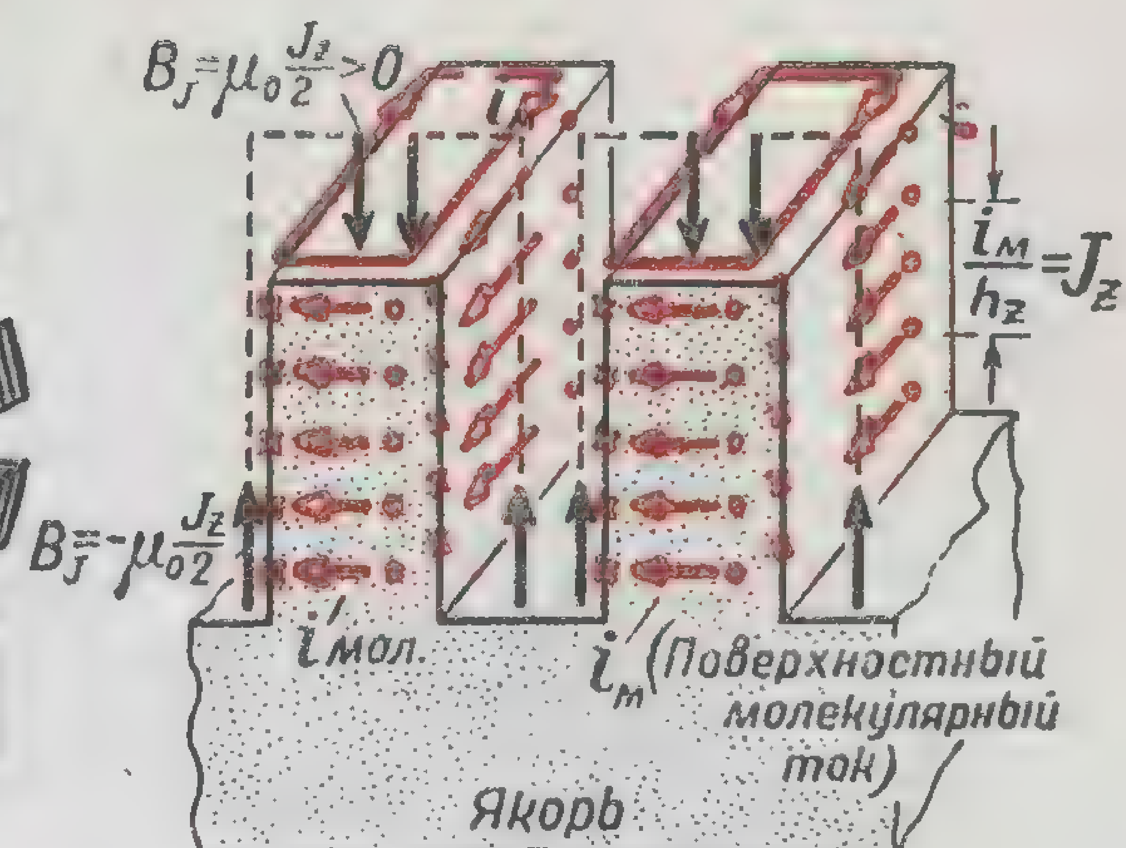
ЗУБЧАТЫЙ ЯКОРЬ



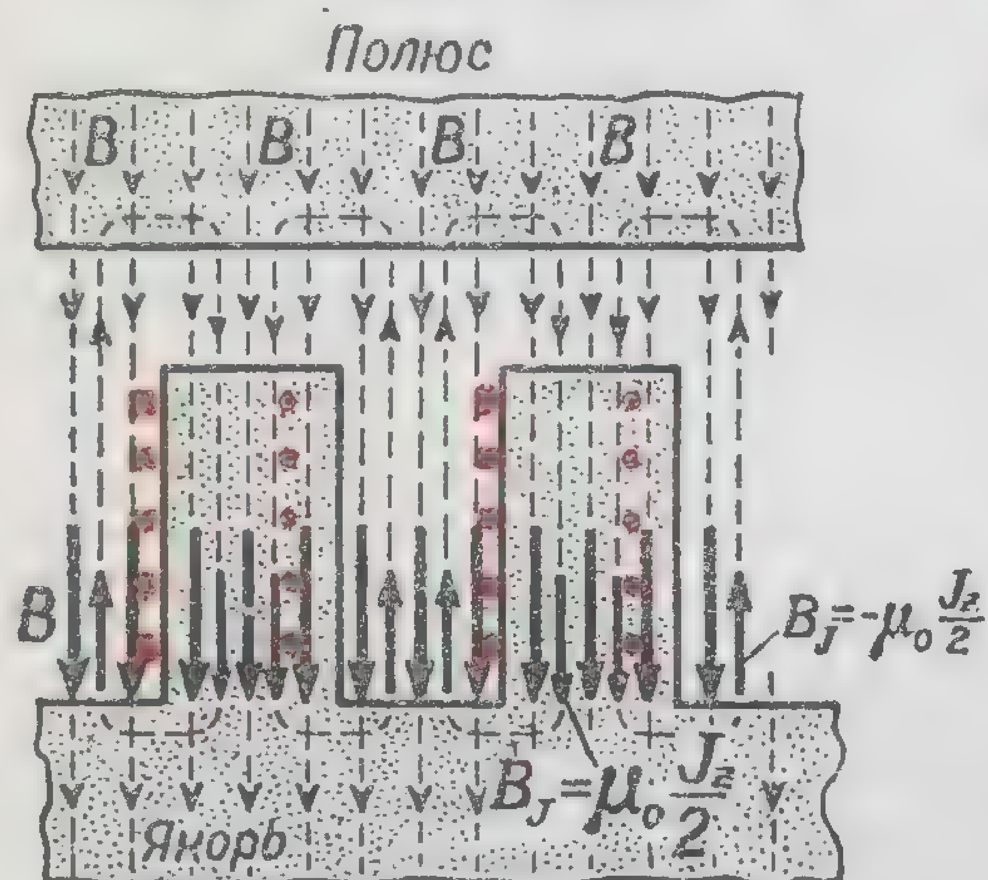
Однородное поле B обмотки возбуждения



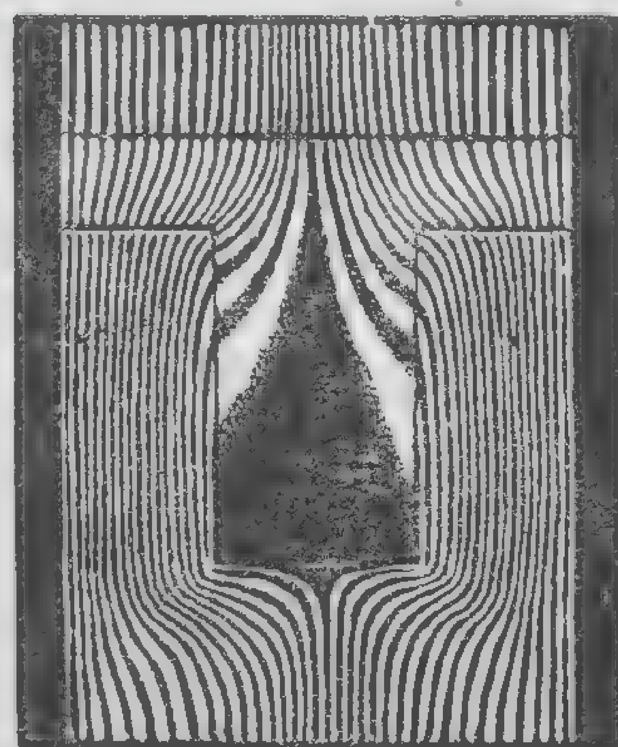
Зубчатый якорь электрической машины

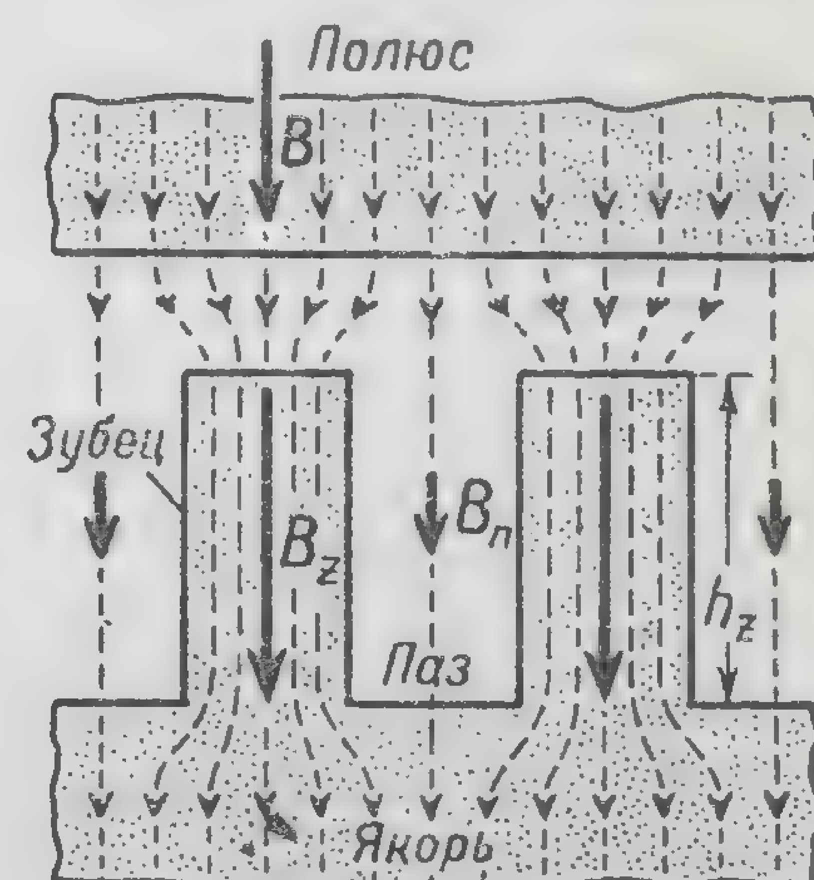


Поле B_J равномерно намагниченных зубцов



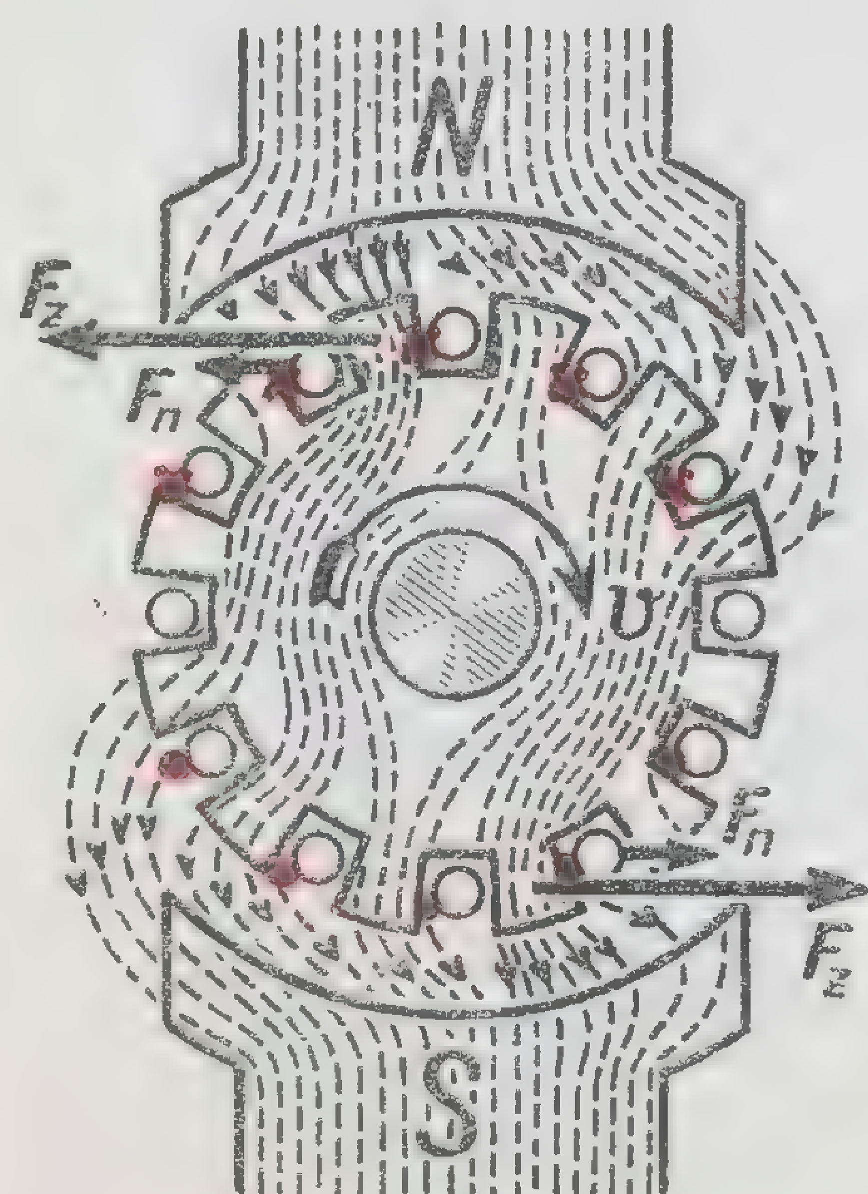
Наложение поля B индуктора на поле B_J намагниченных зубцов


Магнитное экранирование паза зубцами



Результирующее поле

Неравномерное распределение магнитного поля в зубцовом слое электрической машины



Генератор

$$F_п=\mu_0 HIl \ \frac{дж}{м}$$

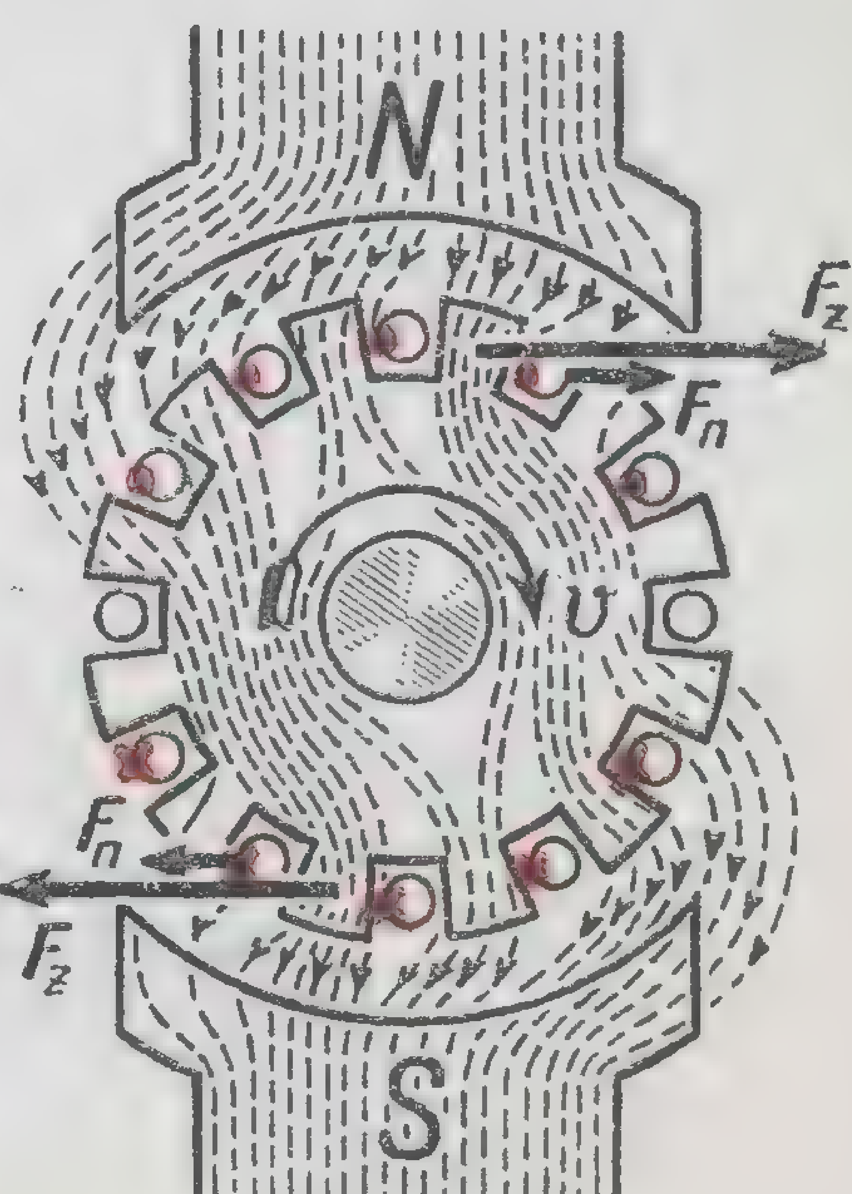
Усилие, приложенное к обмотке паза

$$F_z=\mu_0\frac{J_z}{2}Il \ \frac{дж}{м}$$

Усилие, приложенное к зубцу

$$F=F_п+F_z=BIl \ \frac{дж}{м}$$

Усилие, приложенное к зубцовому делению

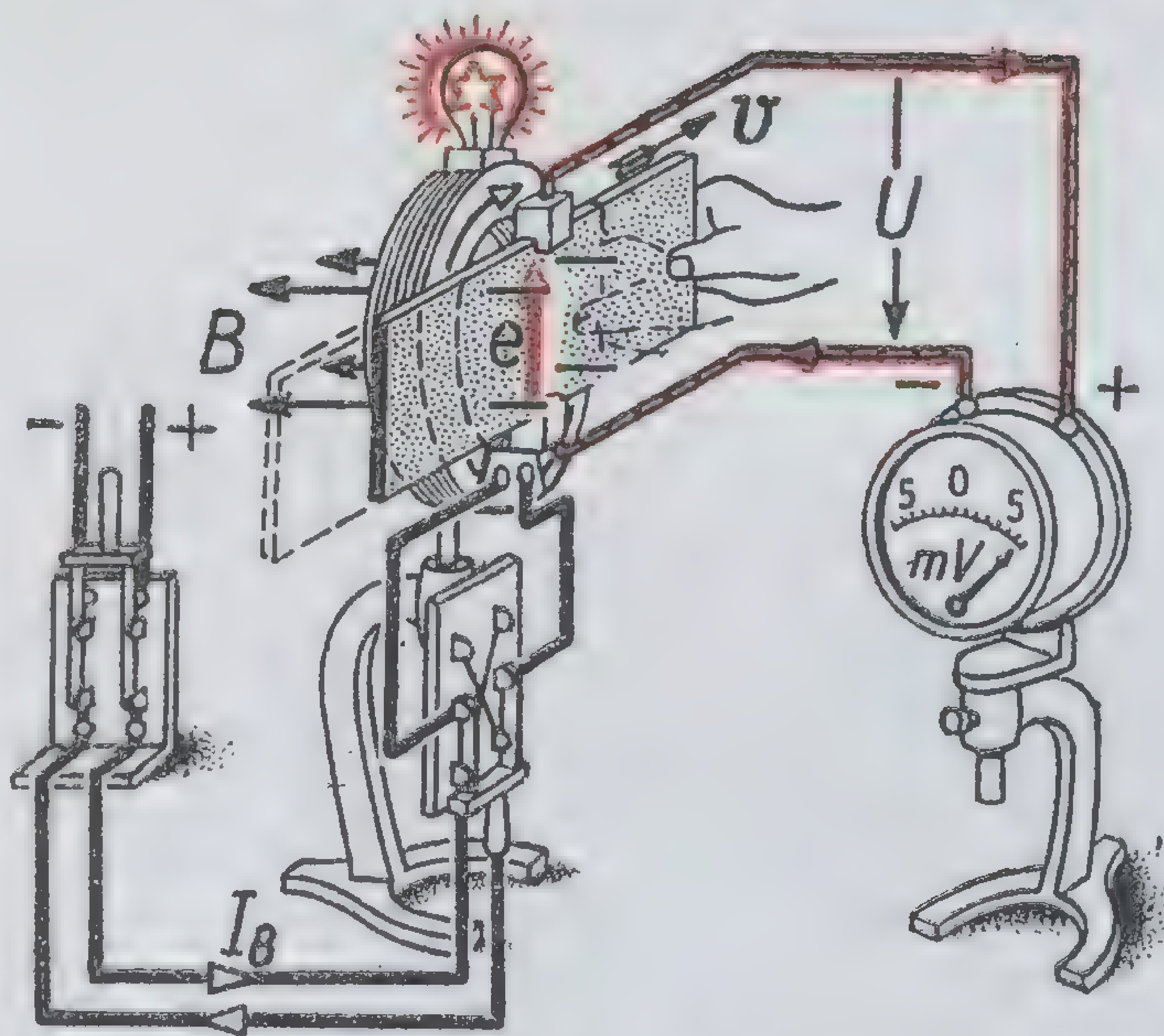


Двигатель

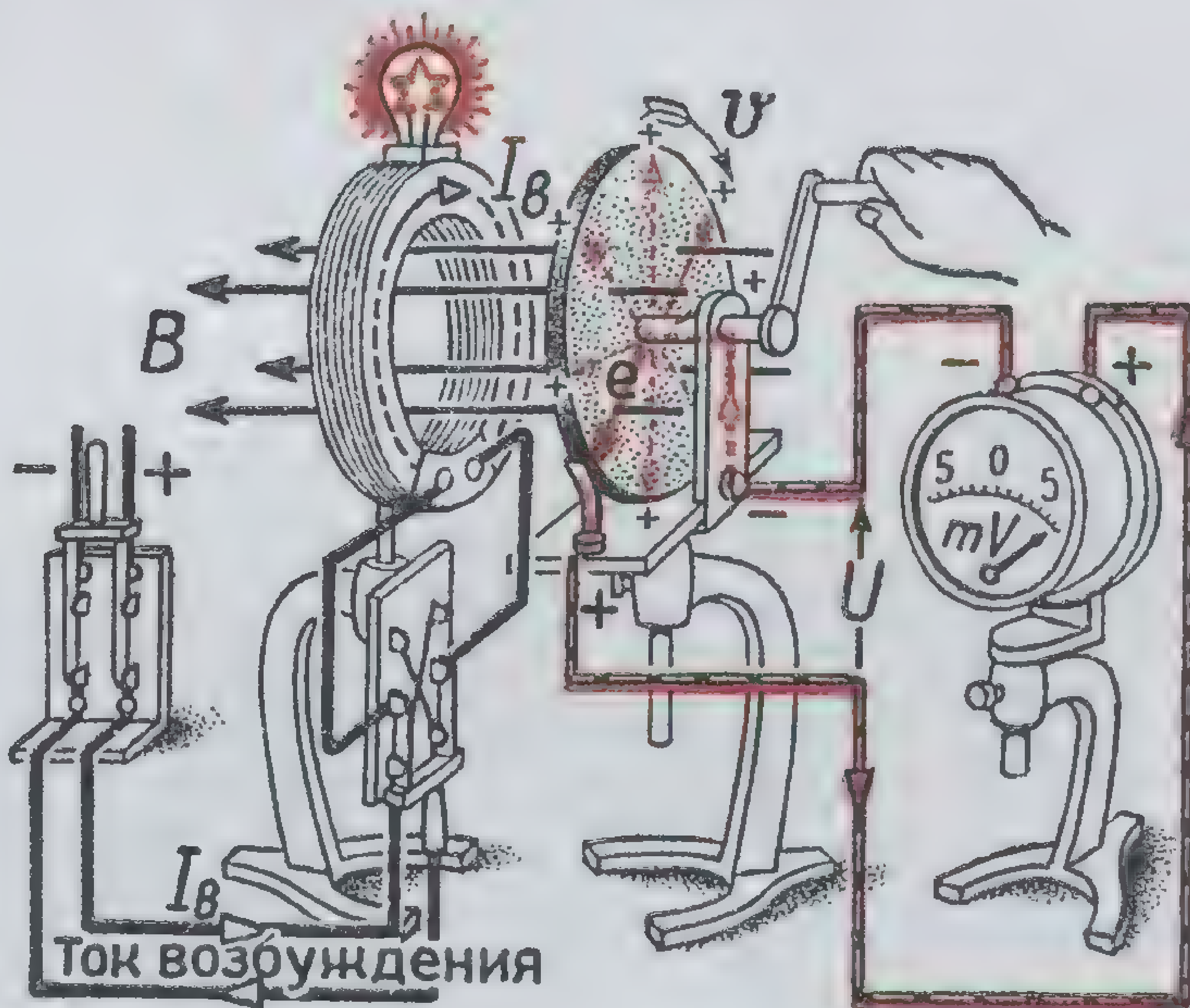
Разгрузка обмотки якоря от механических усилий

Э.И. Расовский

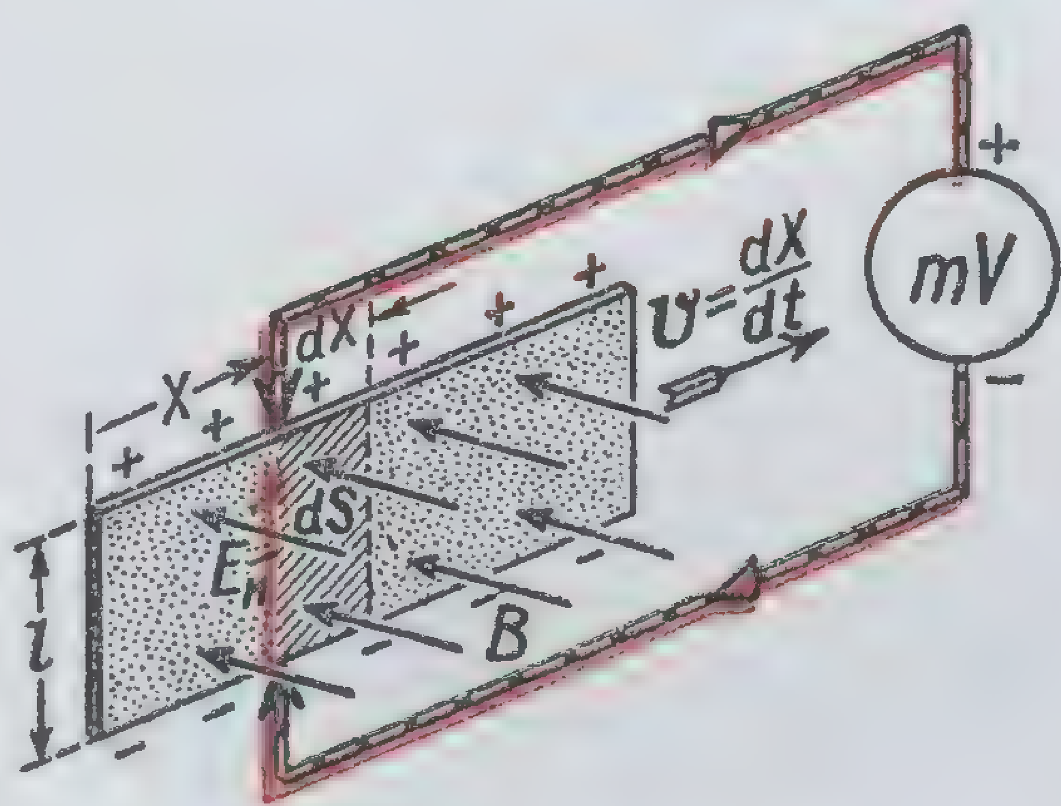
УНИПОЛЯРНАЯ ИНДУКЦИЯ

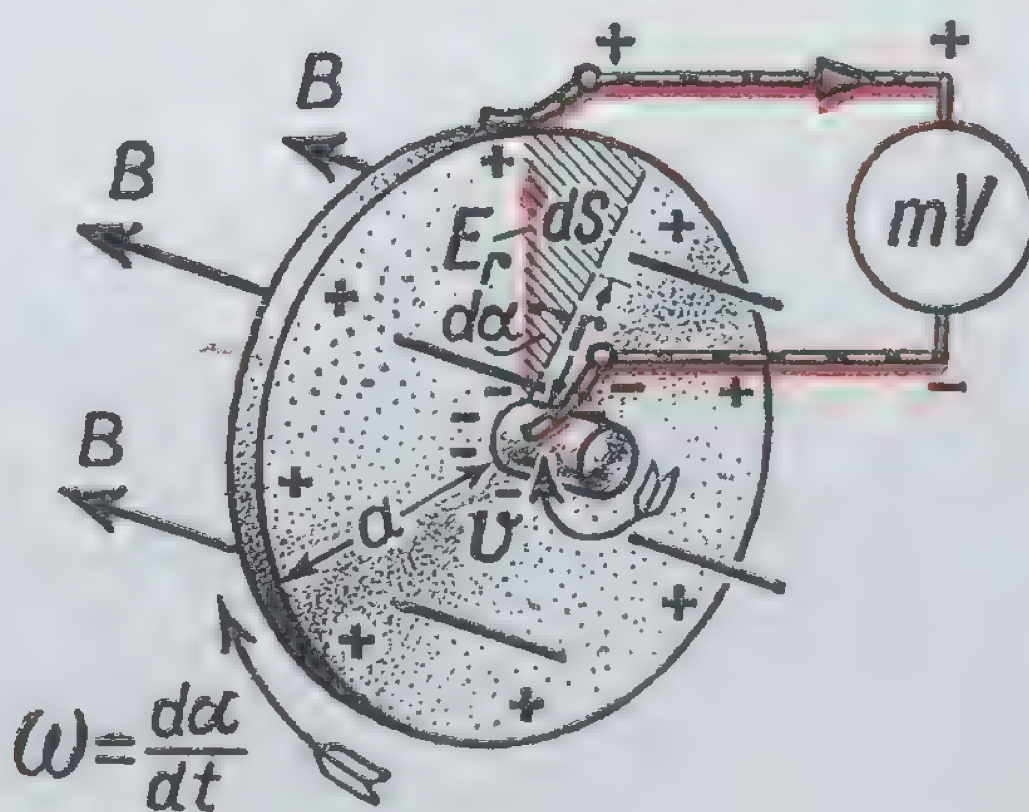


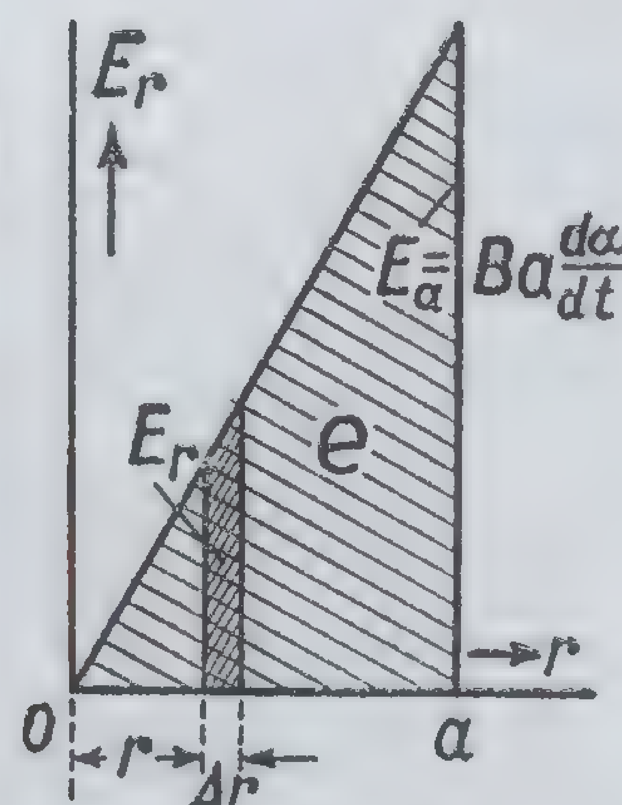
Униполярная индукция
при движении алюминиевой пластины



Модель униполярного генератора
(диск Фарадея)







$$e=E_{н}l=Blv=Bl\frac{dX}{dt}==B\frac{dS}{dt}=\frac{d\Phi}{dt}\ в$$

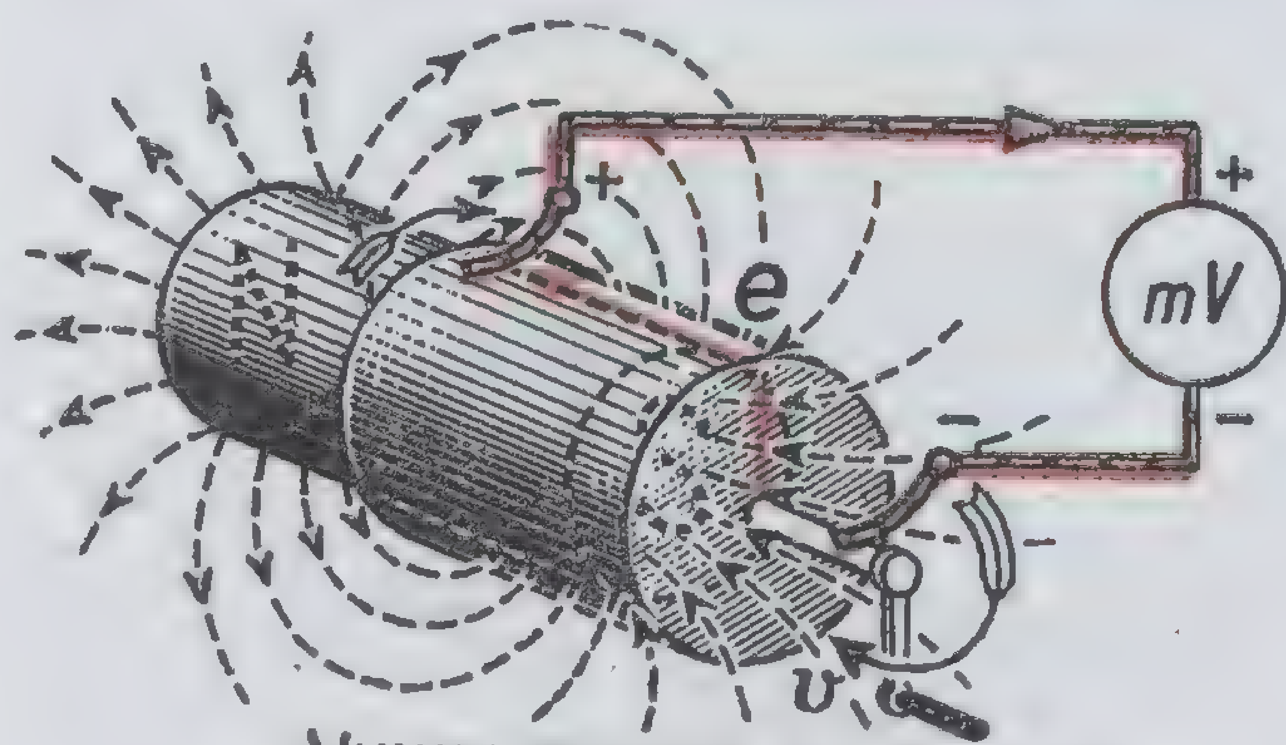
Электродвижущая сила равна скорости пересечения магнитного потока вертикальной линией пластины

$$E_r=Bv_r=Br\omega=Br\frac{d\alpha}{dt}\ \frac{в}{м}$$

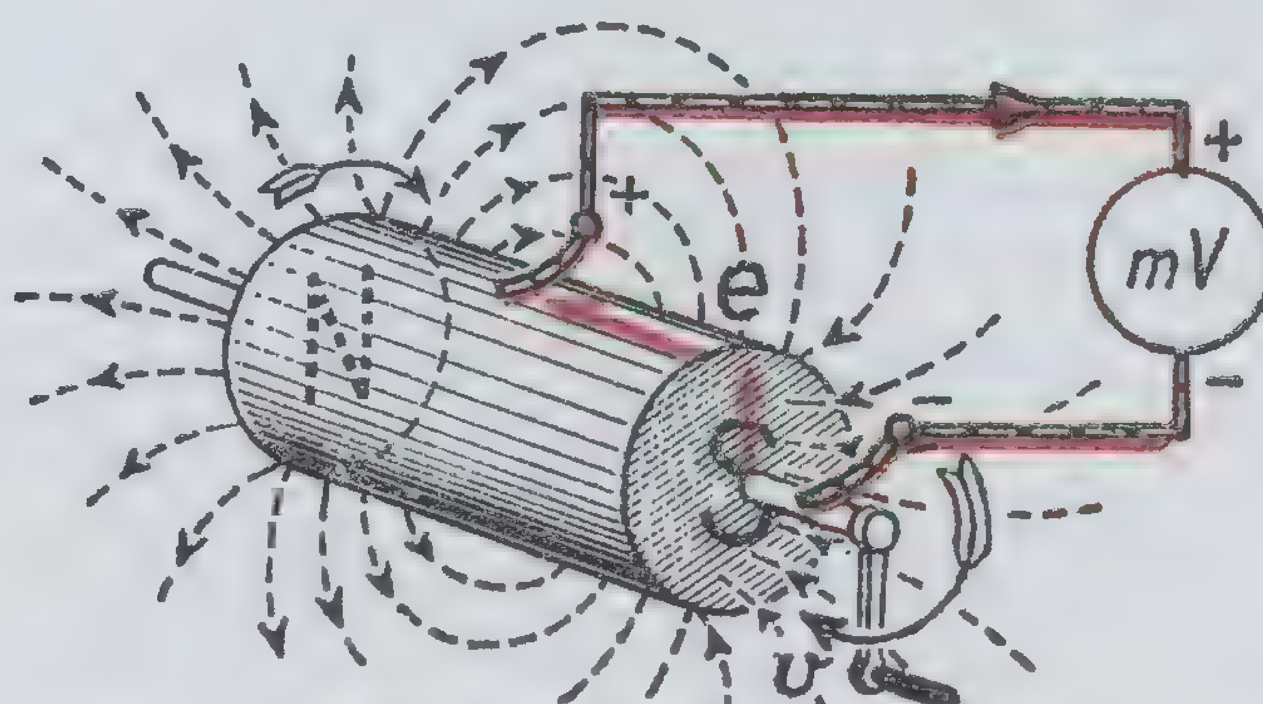
Напряженность электрического поля, индуктируемого в диске, пропорциональна расстоянию от оси

$$e=\sum_0^a E_r\Delta r=\frac{a}{2}E_a==\frac{a^2}{2}\frac{d\alpha}{dt}B=\frac{dS}{dt}B=\frac{d\Phi}{dt}\ в$$

Индуктируемая э.д.с. равна скорости пересечения магнитного потока радиусом диска



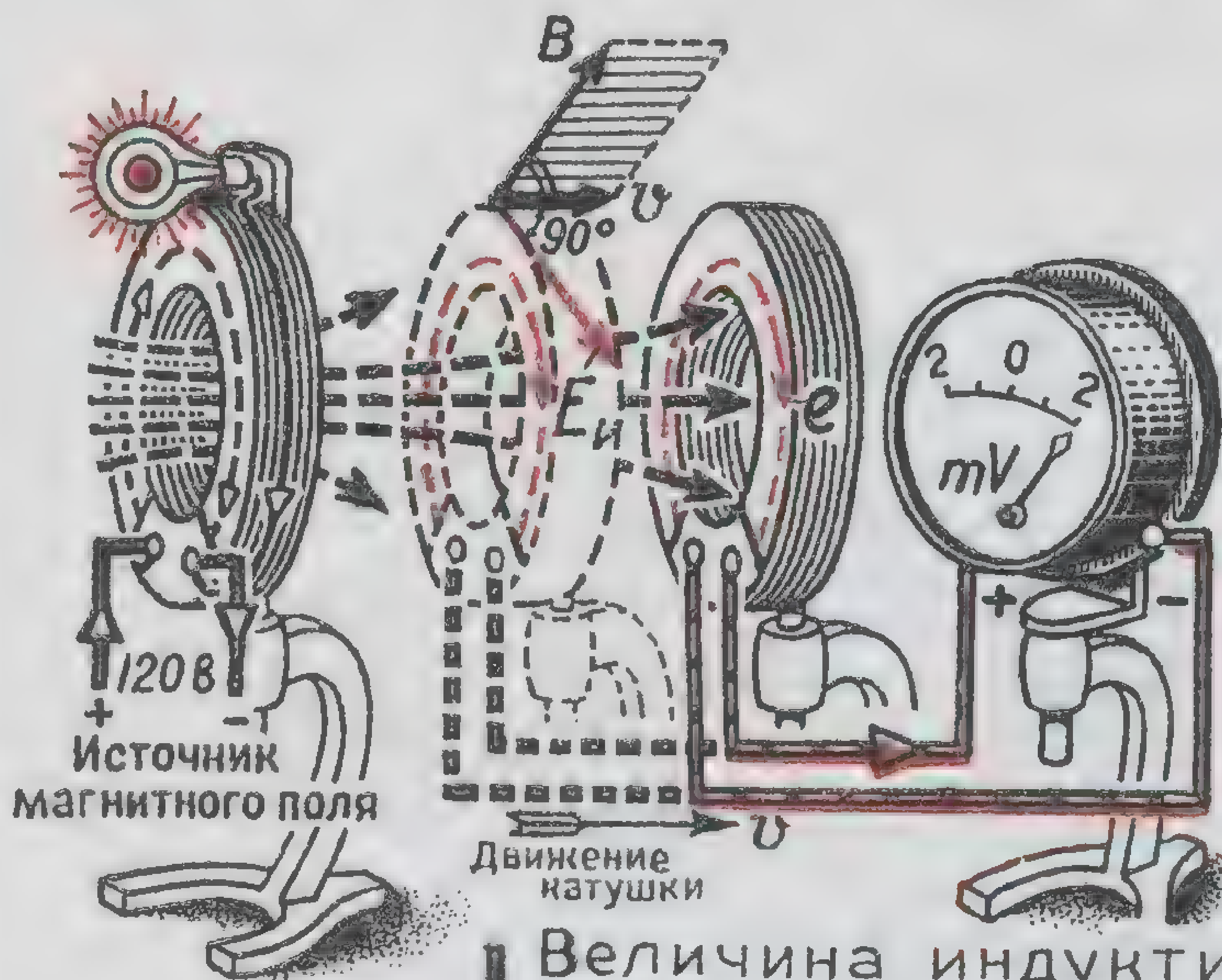
Униполярная индукция
при вращении медного стакана
вокруг неподвижного магнита.

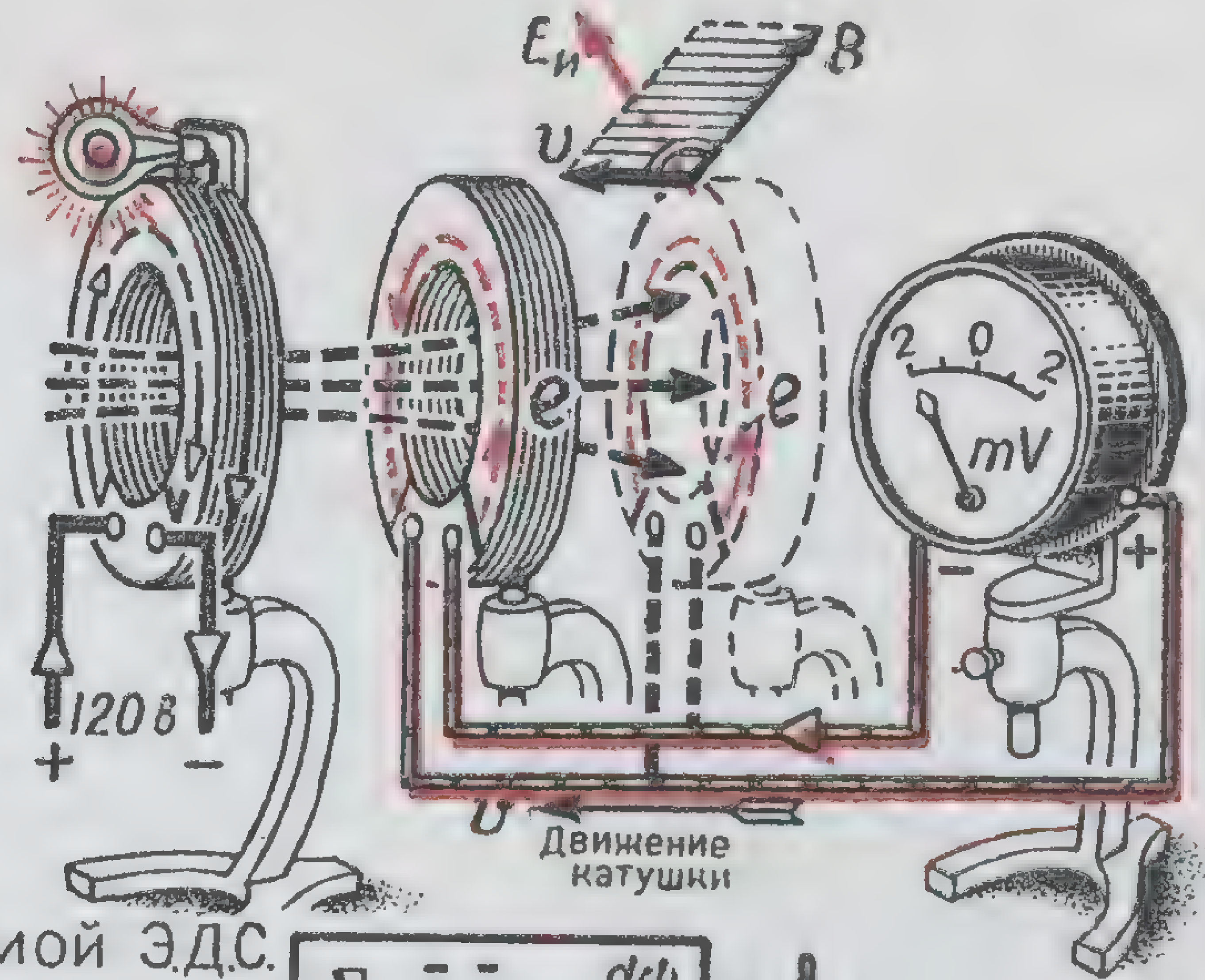


Униполярная индукция
при вращении цилиндрического магнита.

Э.И. Расовский.

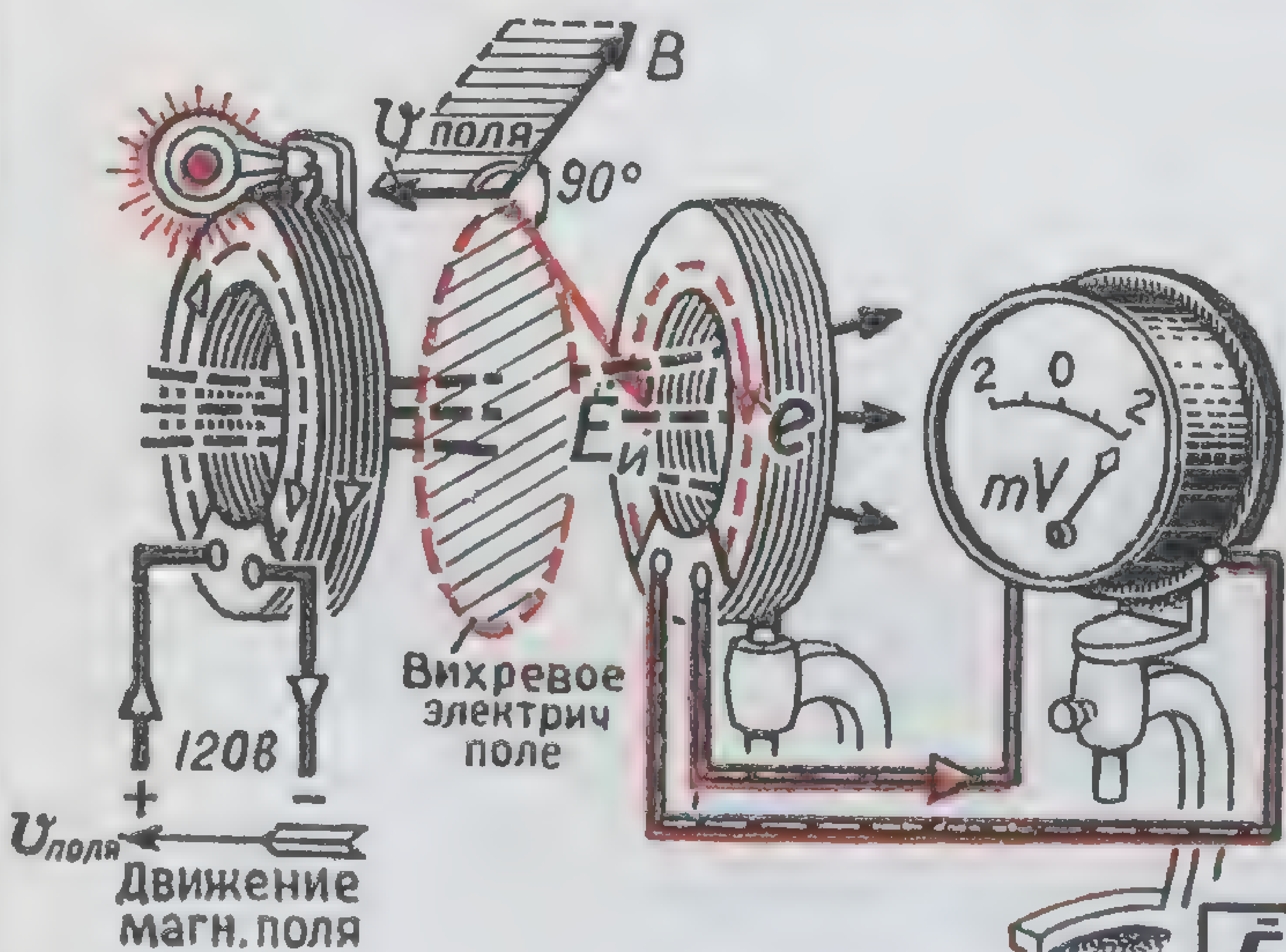
ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

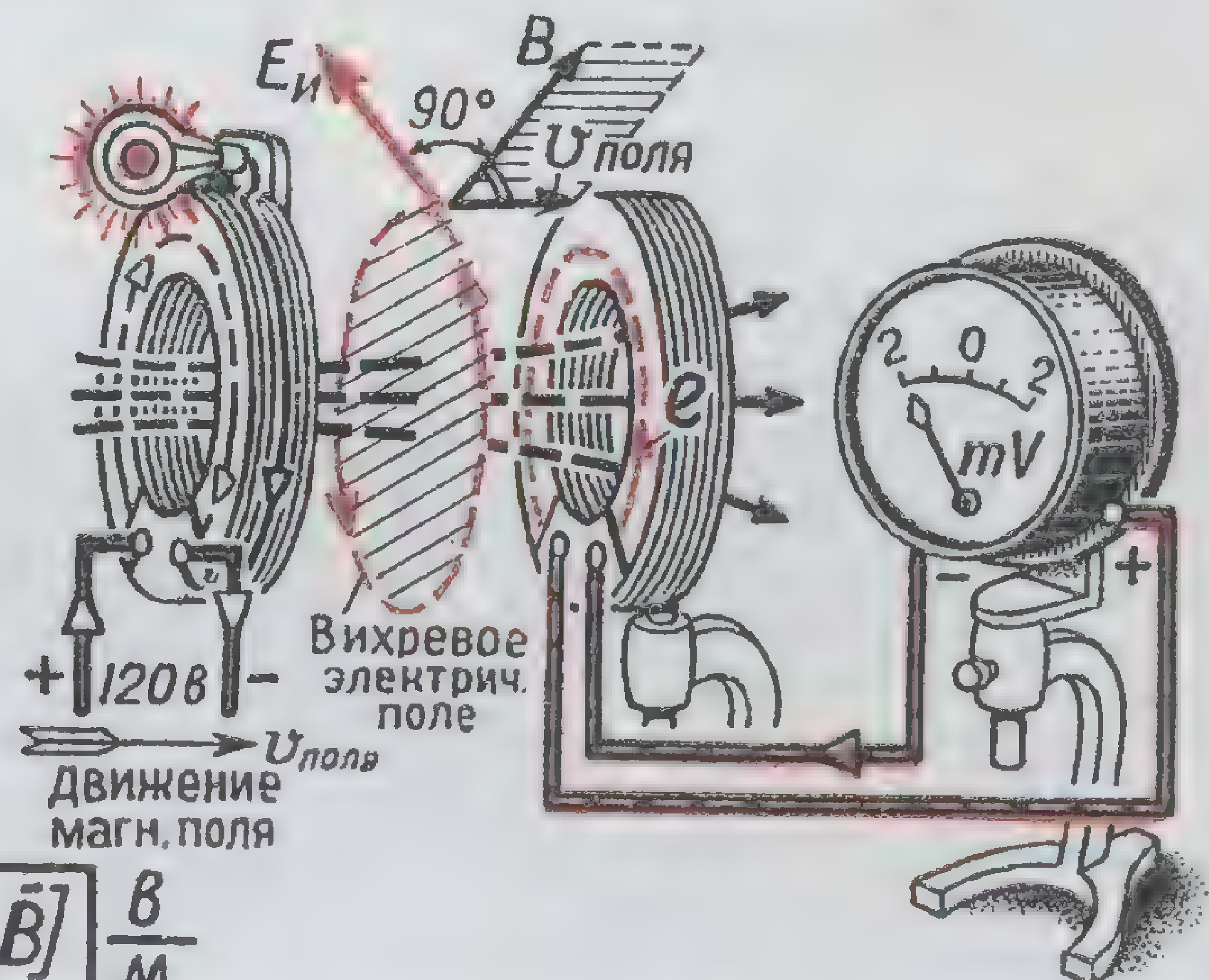




Величина индуктируемой Э.Д.С. равна скорости пересечения (изменения) охватываемого магнитного потока $\Sigma_0 \bar{E}_и \bar{l} = e_0 = \frac{d\varphi}{dt}$ в

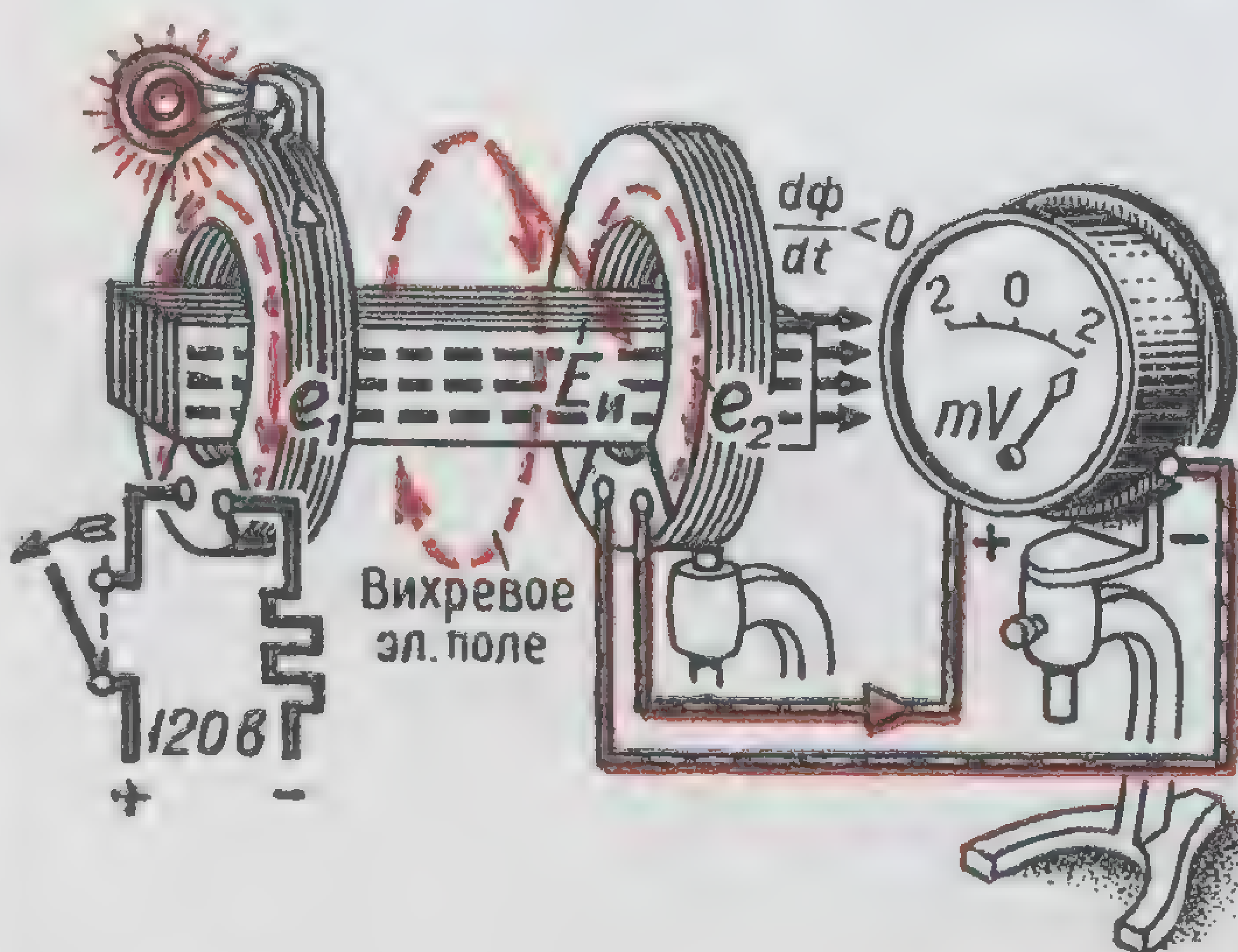
Наведение Э.Д.С. в катушке, движущейся в магнитном поле

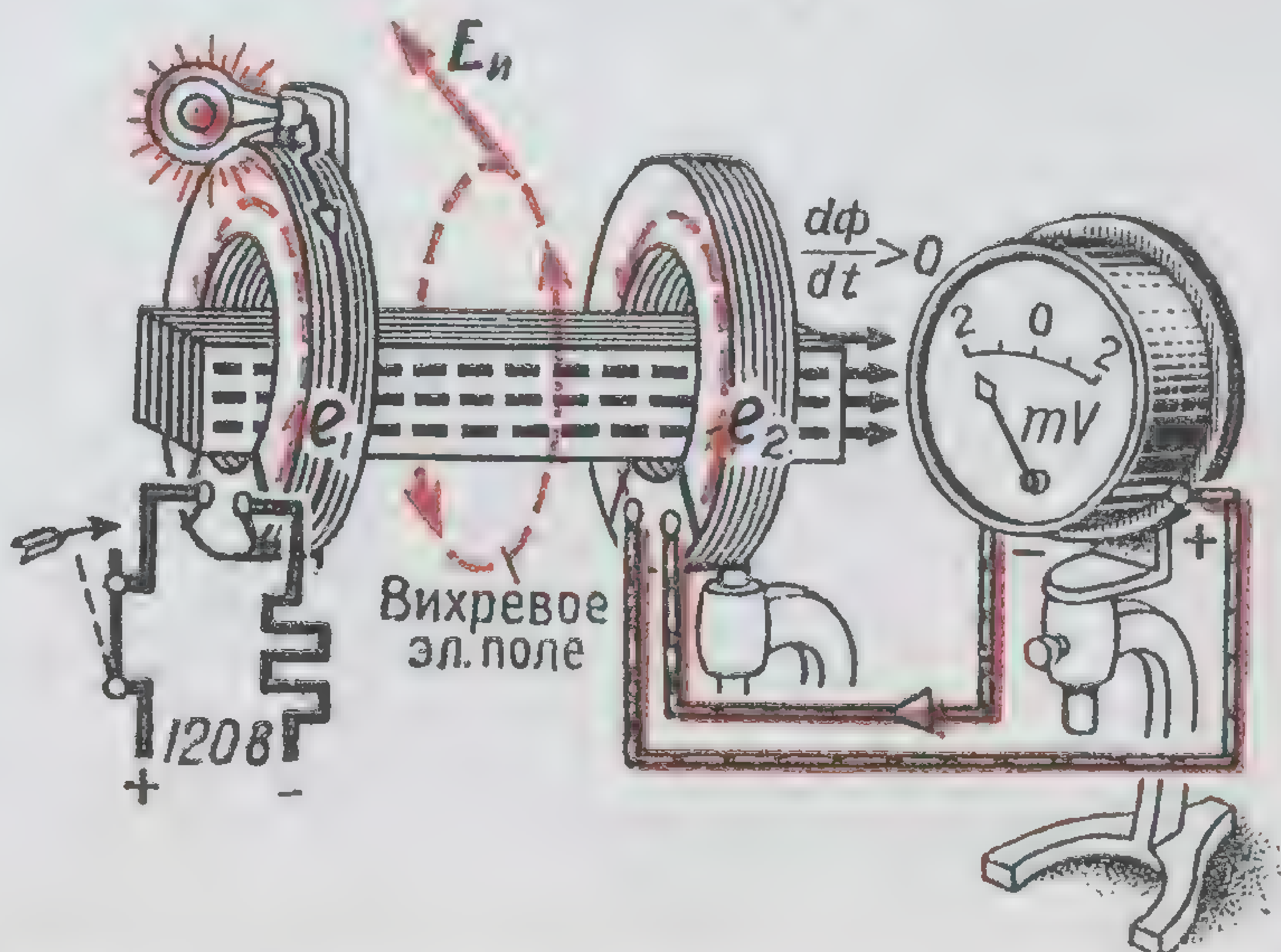




$\bar{E}_и = -[\bar{\upsilon}_{поля} \bar{B}]$ $\frac{в}{м}$

Движущееся магнитное поле образует вихревое электрическое поле





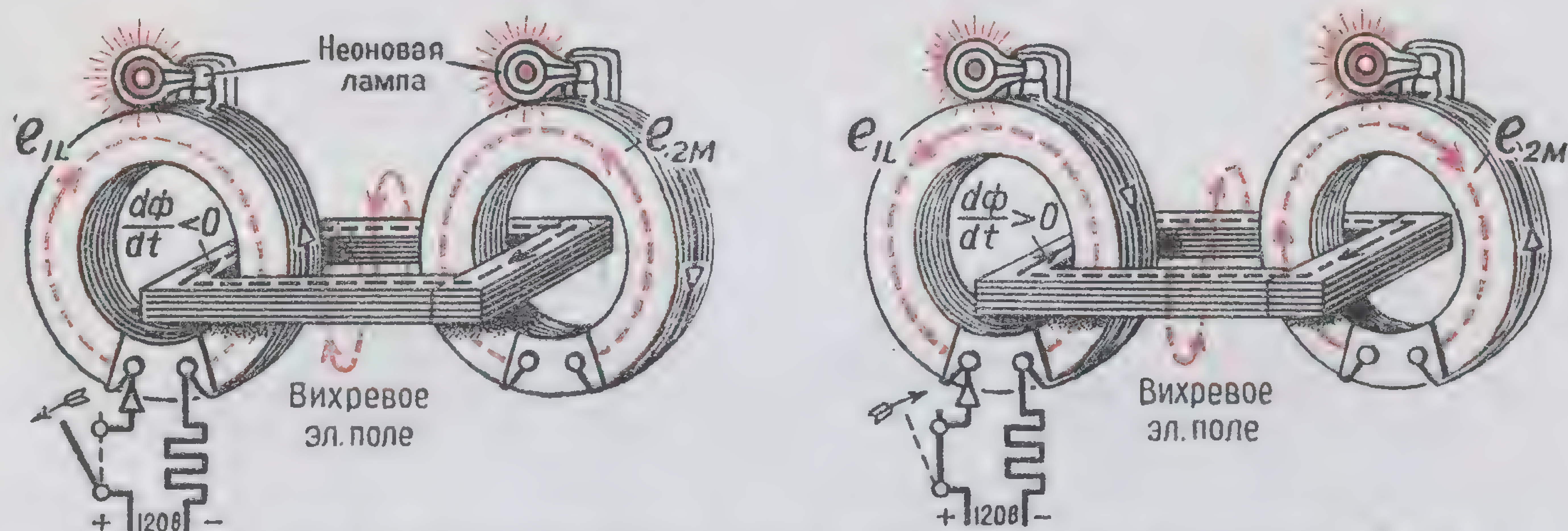
Меняющееся во времени магнитное поле образует в окружающем пространстве вихревое электрическое поле

Э.И. Расовский.

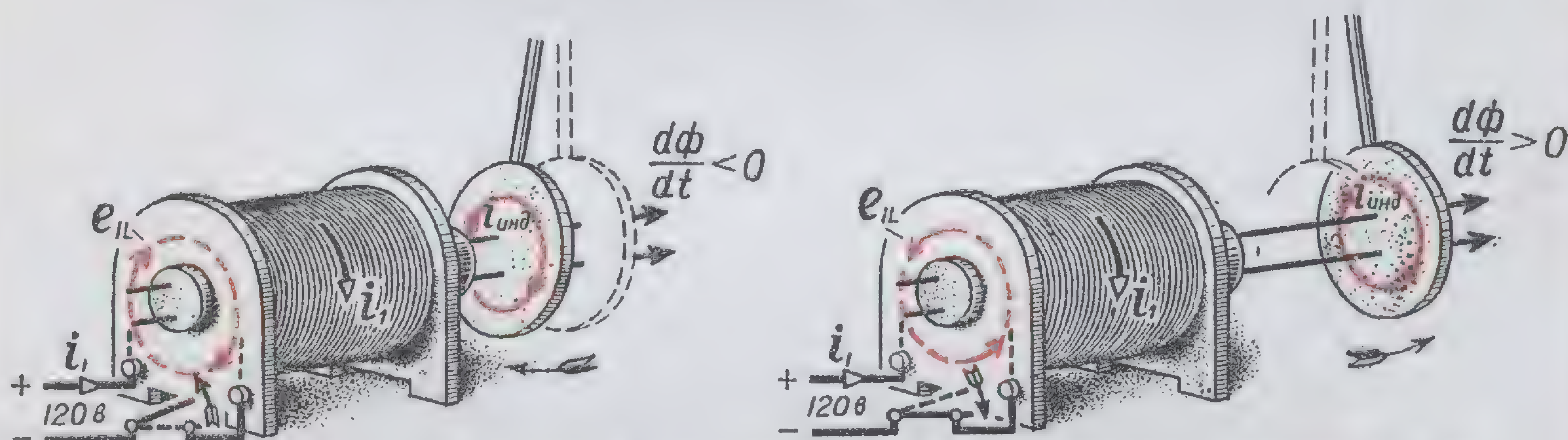
Худ. А. Меньшиков

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

(продолжение)



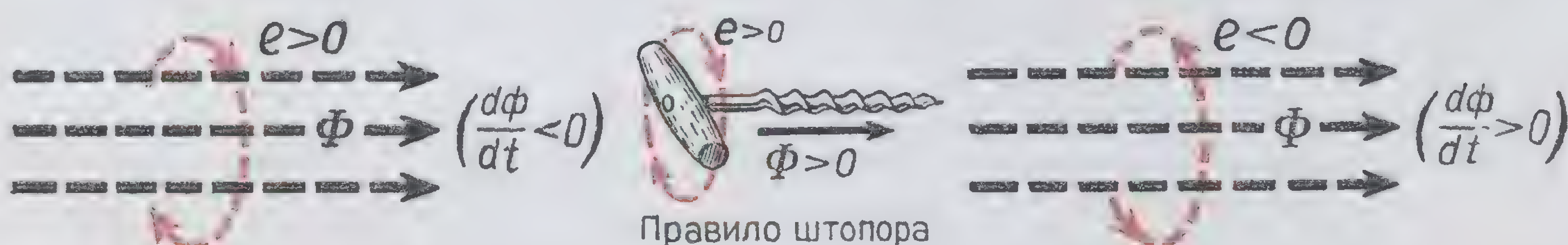
Наведение электродвижущей силы само- и взаимоиндукции (e_{1L}, e_{2M}) при включении и выключении первичного тока



Притяжение и отталкивание алюминиевого диска с индуктированным током при убывании и возрастании магнитного потока

ИНДУКТИРУЕМАЯ Э.Д.С. „СТРЕМИТСЯ" ВЫЗВАТЬ ТОК, ПРЕПЯТСТВУЮЩИЙ ИЗМЕНЕНИЮ МАГНИТНОГО ПОТОКА

Закон Ленца



Правило штопора

При **УБЫВАНИИ** магнитного потока индуктируемая э.д.с. **ПОЛОЖИТЕЛЬНА**, т.е направлена **ПО** часовой стрелке

При **ВОЗРАСТАНИИ** магнитного потока индуктируемая э.д.с. **ОТРИЦАТЕЛЬНА**, т.е. направлена **ПРОТИВ** часовой стрелки

$$e=-\frac{d\phi}{dt}\ в$$

Закон электромагнитной индукции
(формулировка Максвелла)

ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА, ИНДУКТИРУЕМАЯ В ЗАМКНУТОМ КОНТУРЕ, **РАВНА СКОРОСТИ УМЕНЬШЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА,** ОХВАТЫВАЕМОГО ЭТИМ КОНТУРОМ

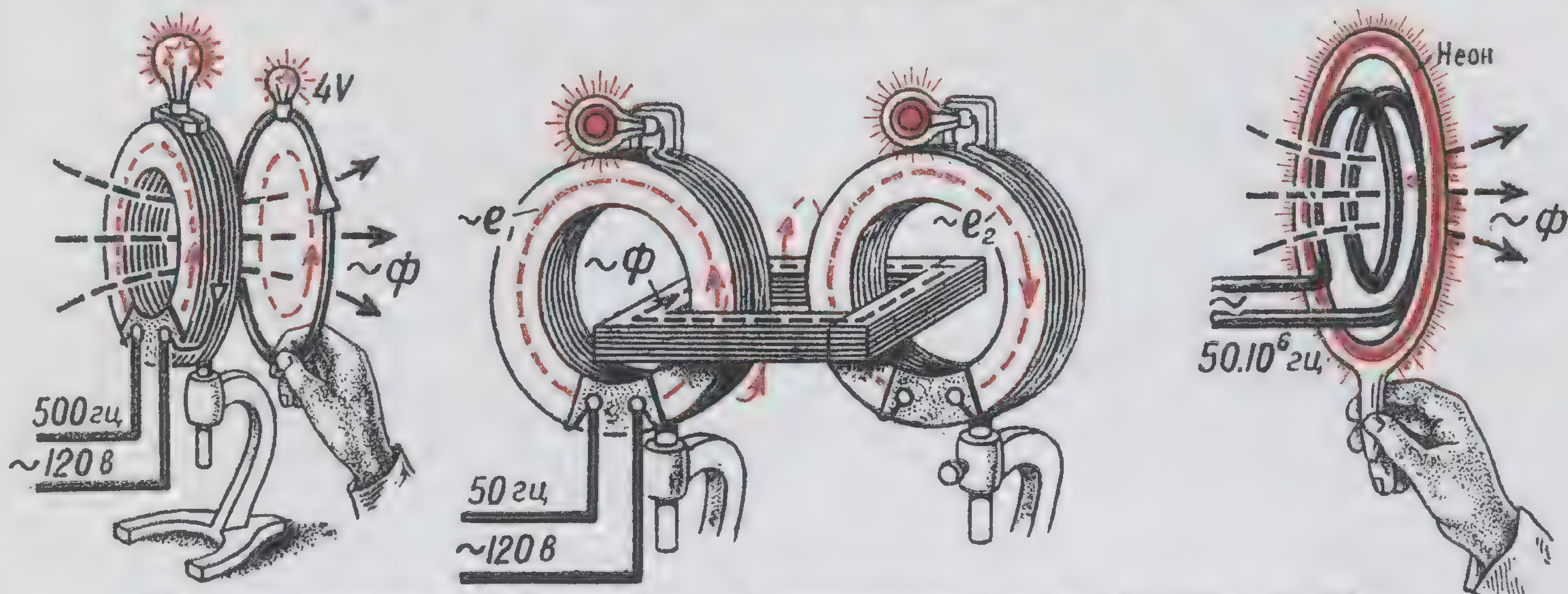
e $\frac{d\phi}{dt}<0$ V $\psi=w\phi$

$$e=-w\frac{d\phi}{dt}\ в$$

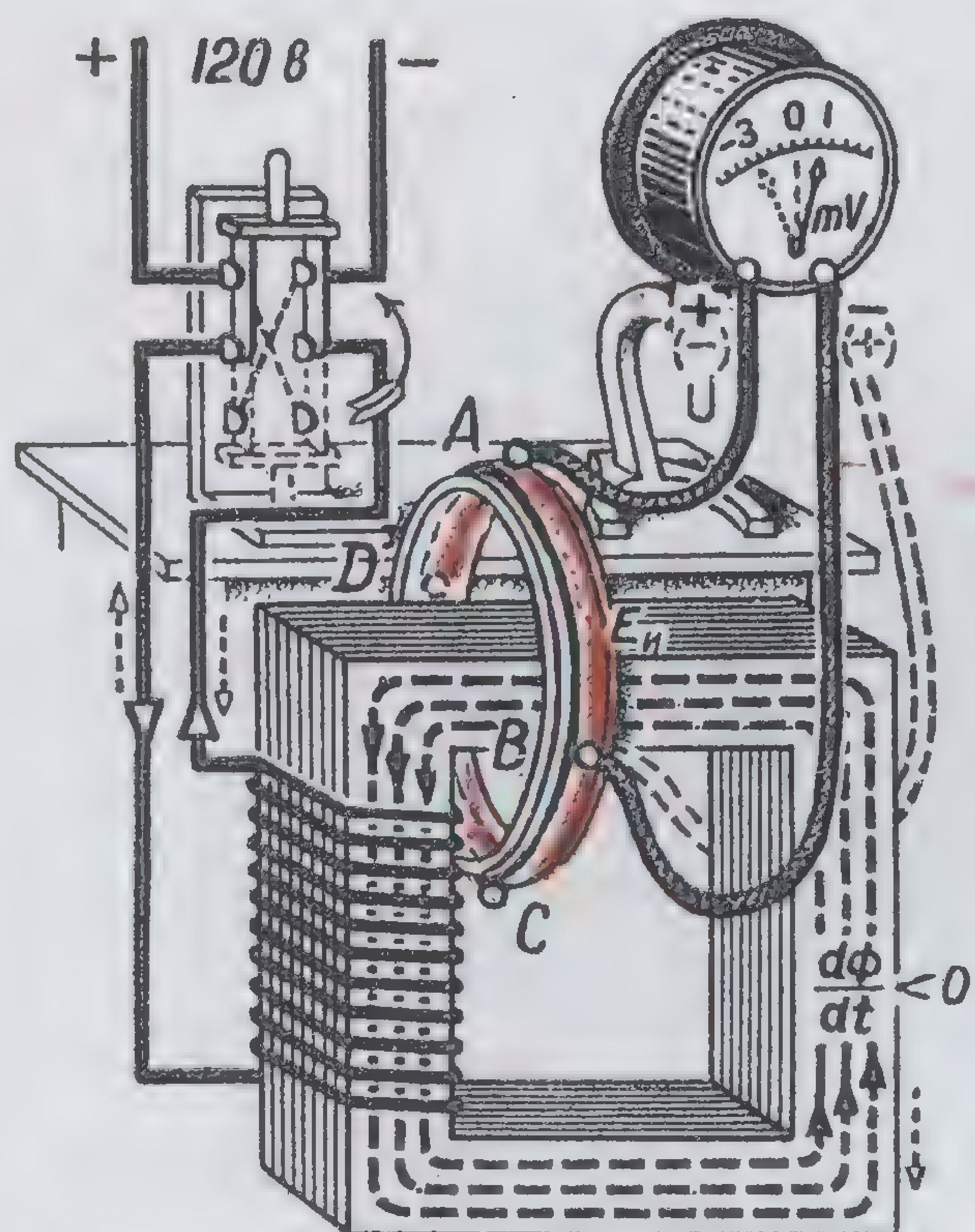
Э.И. Расовский

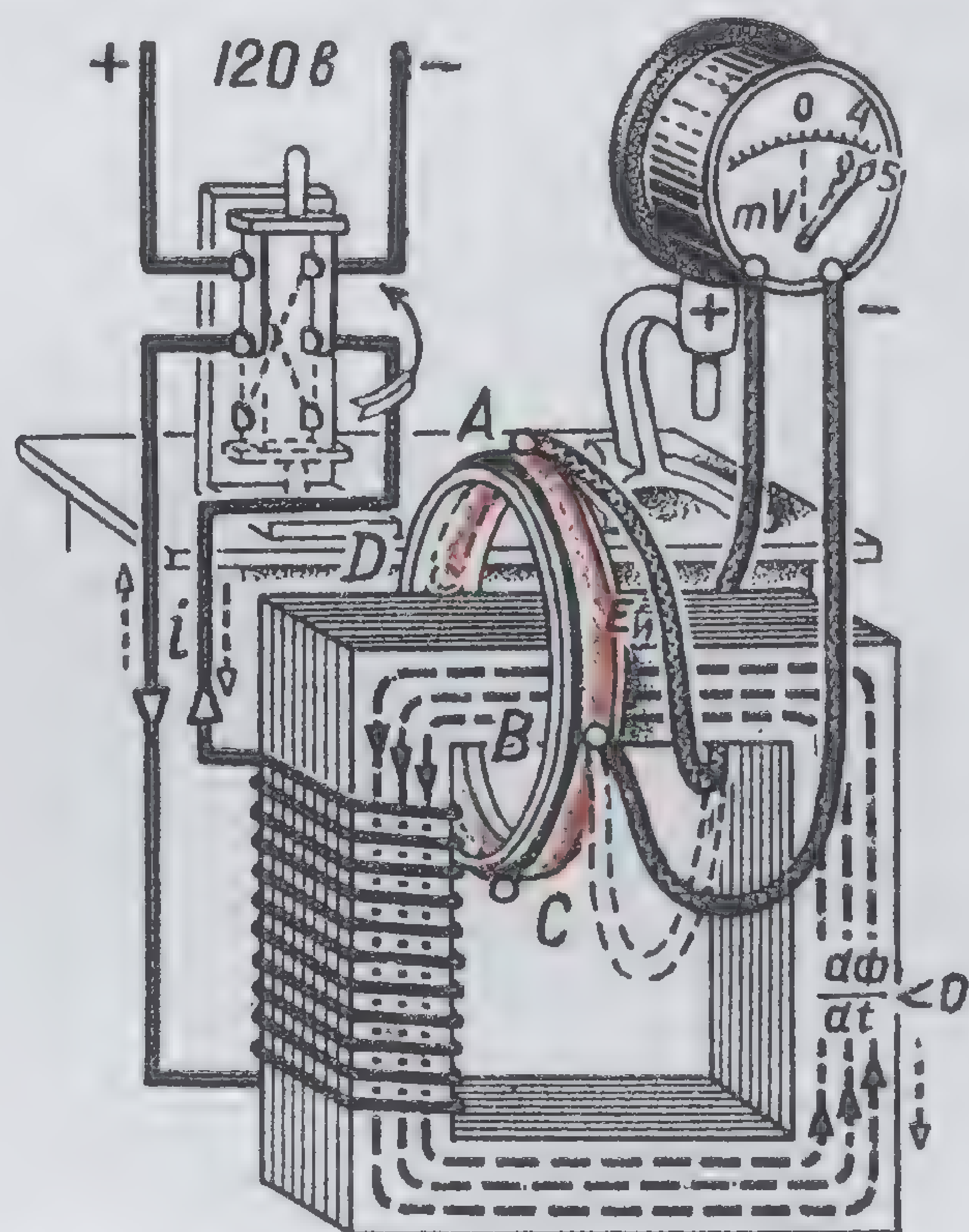
Худ. А Меньшиков

ВИХРЕВОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



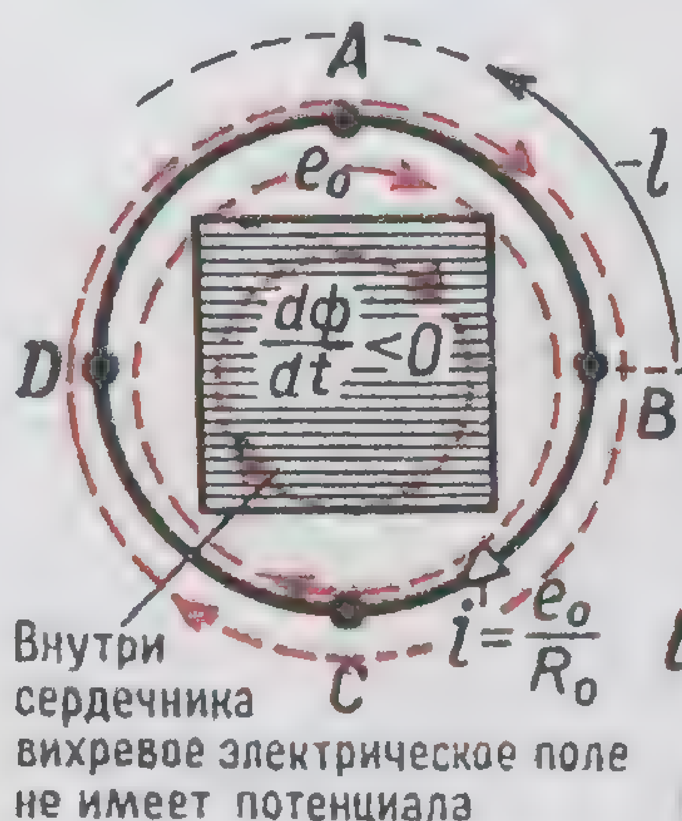
Вихревое электрическое поле при переменном токе в 50, 500 и $50 \cdot 10^6$ гц





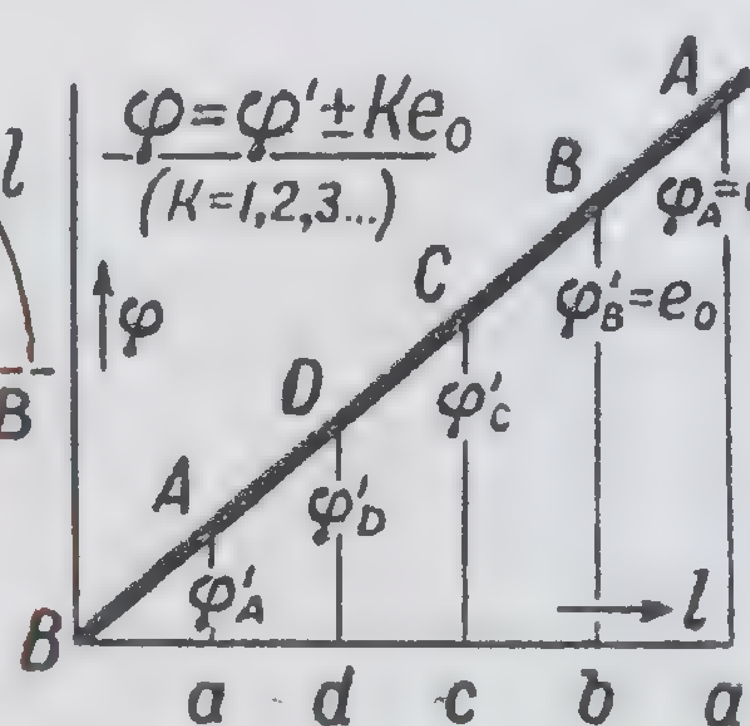
Вихревое электрическое поле в медном витке с напряжением обхода $\Sigma_0 \bar{E}_и \bar{l} = e_0 = 4$ мв.

Напряжение между точками *A* и *B* зависит от расположения соединительных проводов (напряжение зависит от пути)

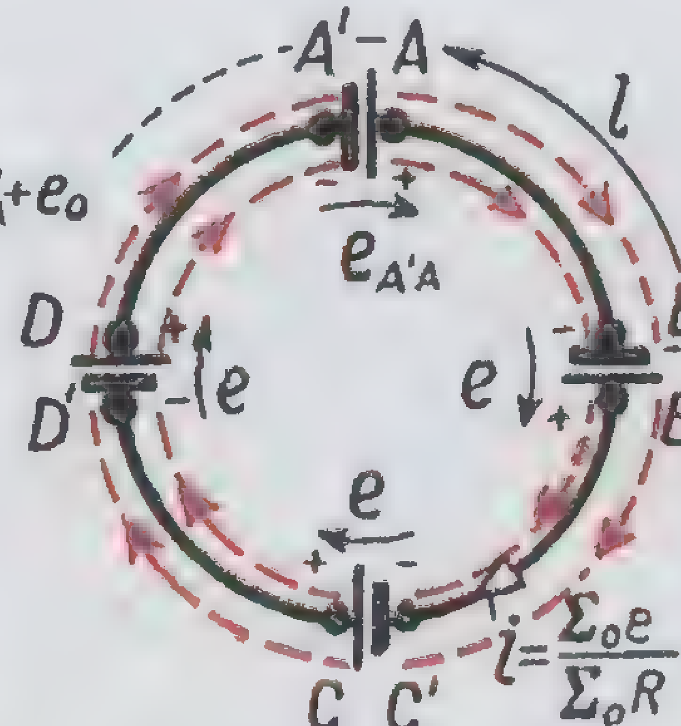


Внутри сердечника вихревое электрическое поле не имеет потенциала

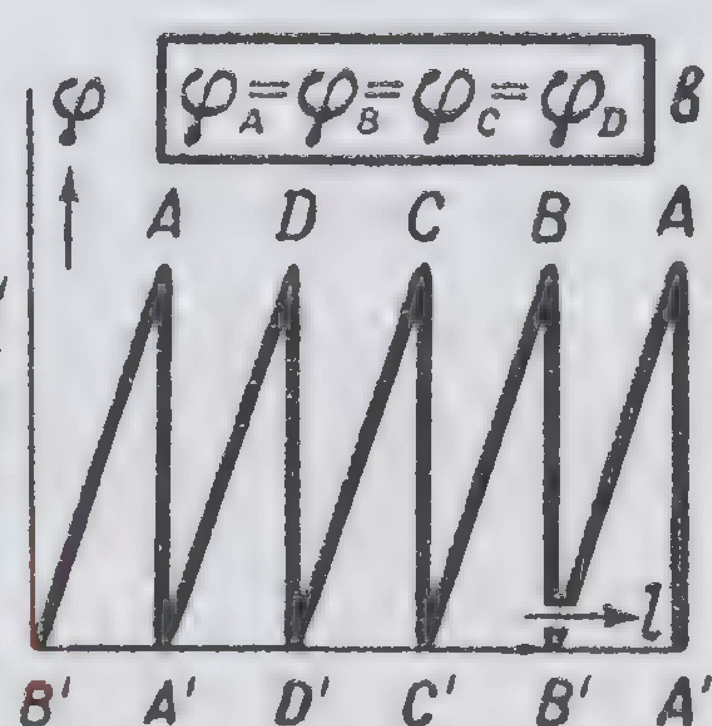
Замкнутый виток в вихревом поле



Потенциал в вихревом поле вокруг сердечника **многозначен**



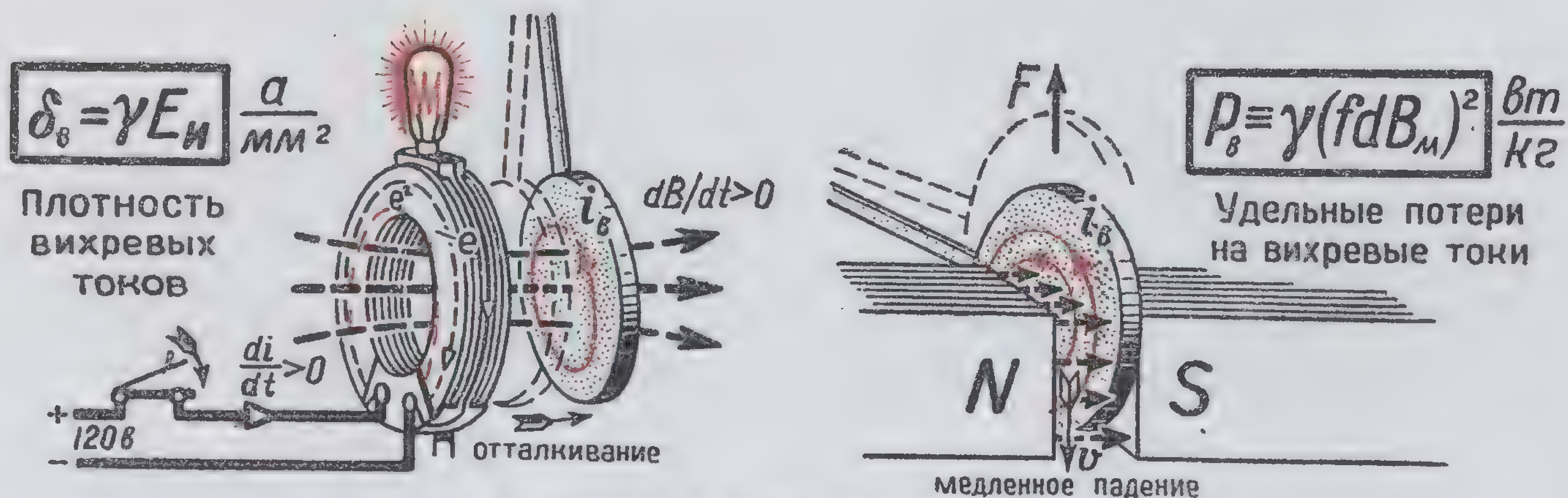
Замкнутый контур с 4 аккумуляторами (аналогия)



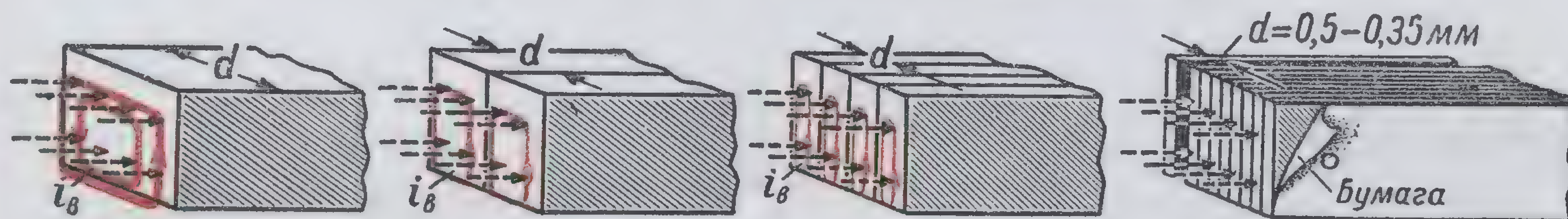
Потенциал в стационарном эл. поле **однозначен**

Э. И. Расовский.

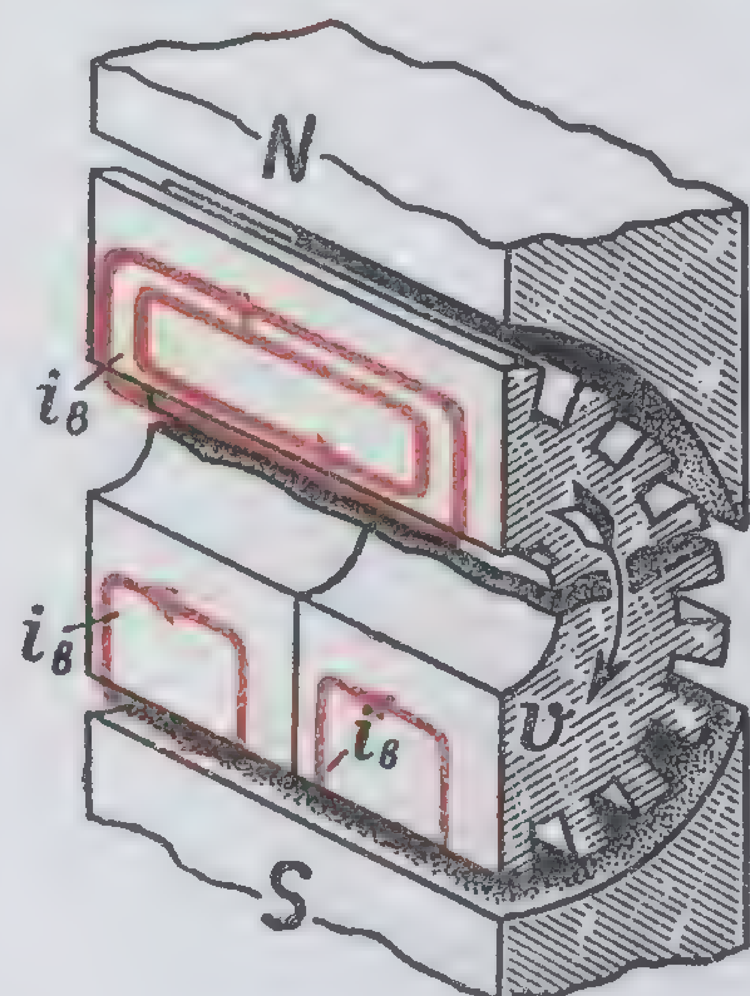
ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

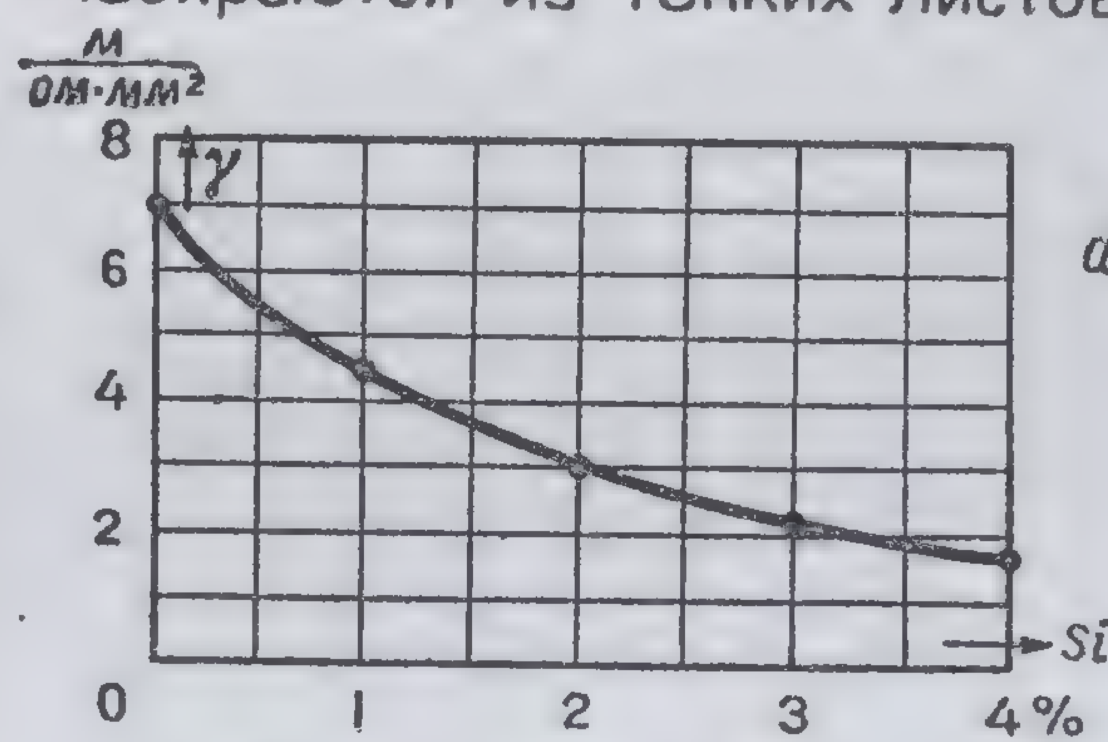


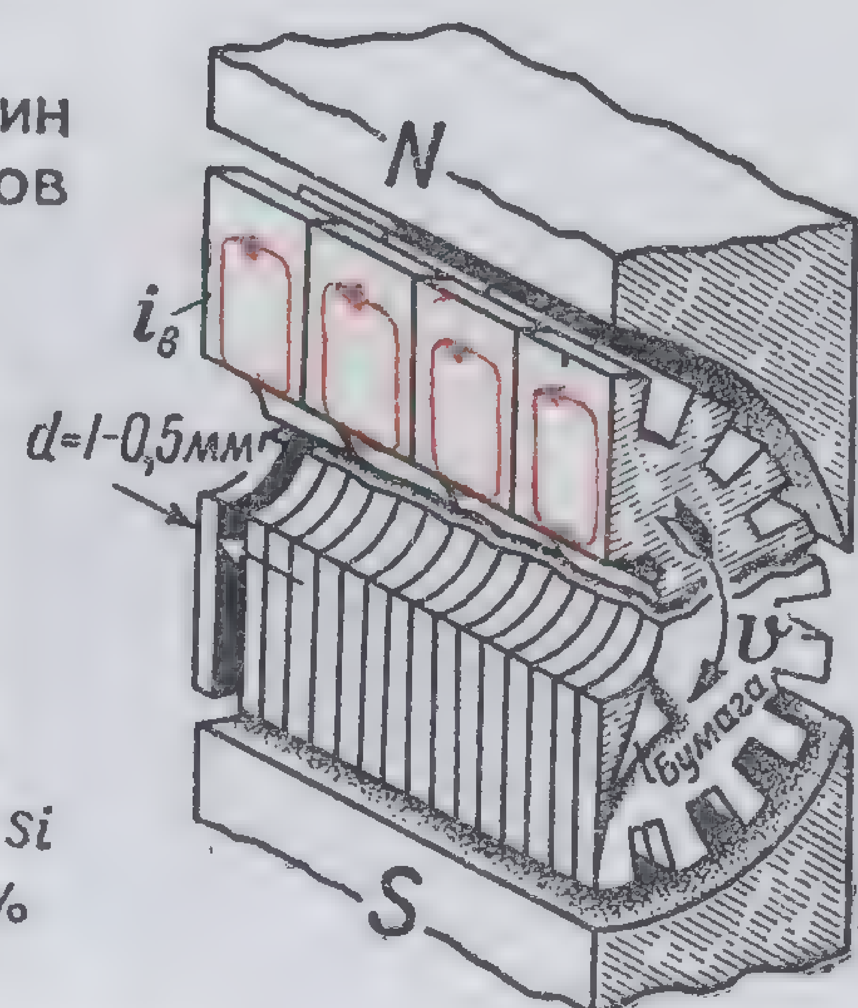
Вихревые токи в алюминиевом диске



Для уменьшения потерь стальные сердечники и якоря электрических машин набираются из тонких листов

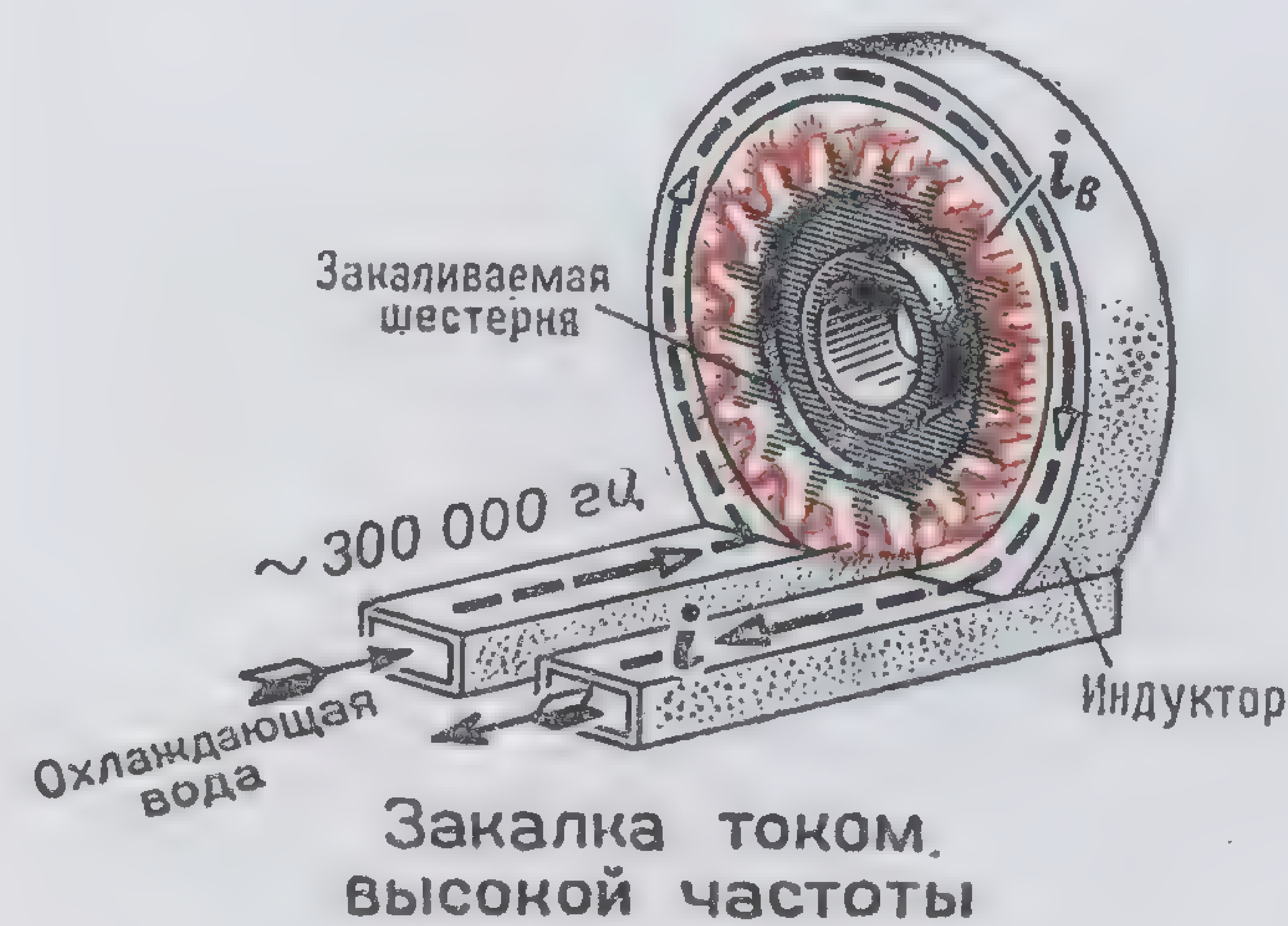






Добавление кремния (Si) уменьшает проводимость и потери в стали

Уменьшение потерь на вихревые токи



Закалка током высокой частоты

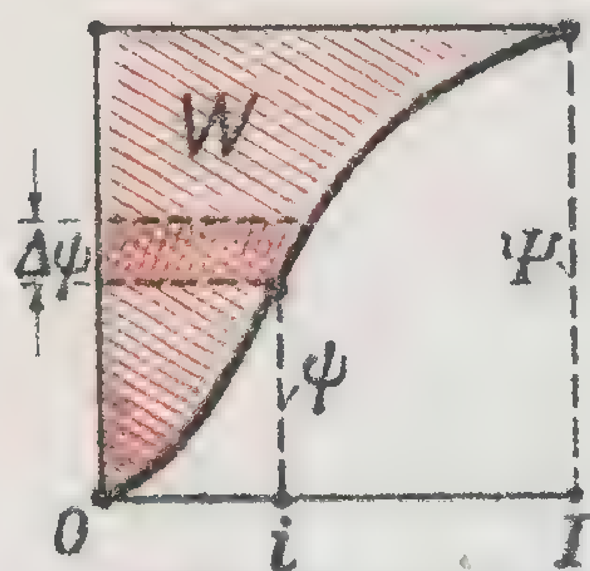


Электромагнитное торможение

Использование вихревых токов

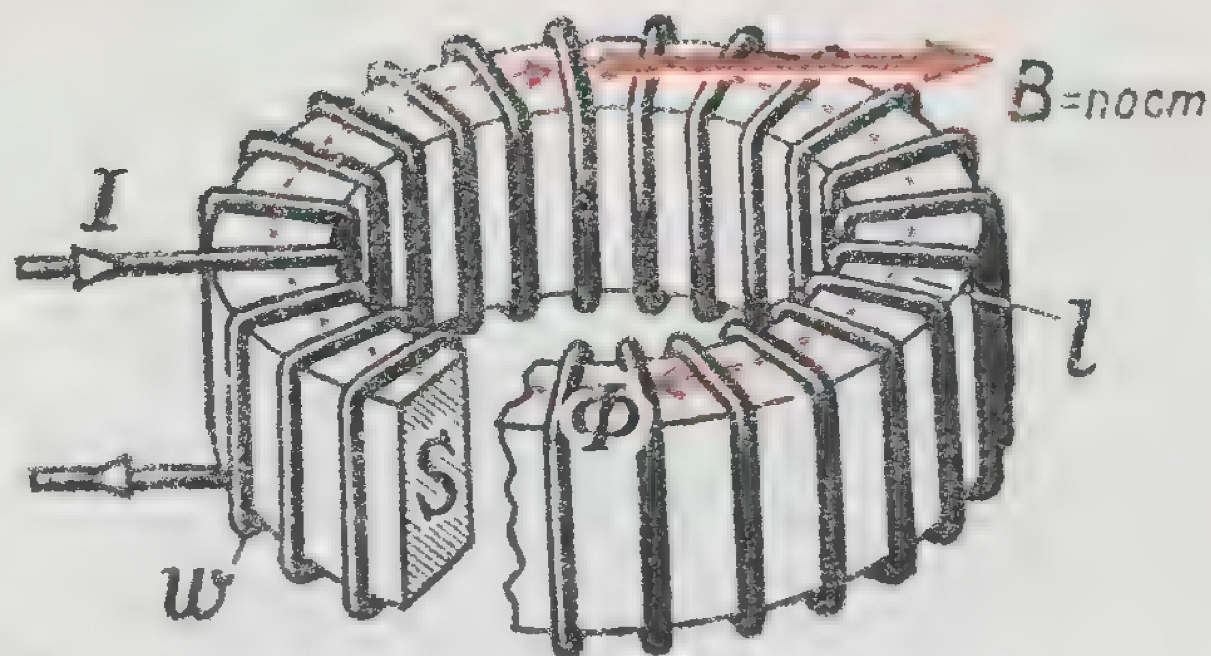
Э. И. Расовский.

ЭНЕРГИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

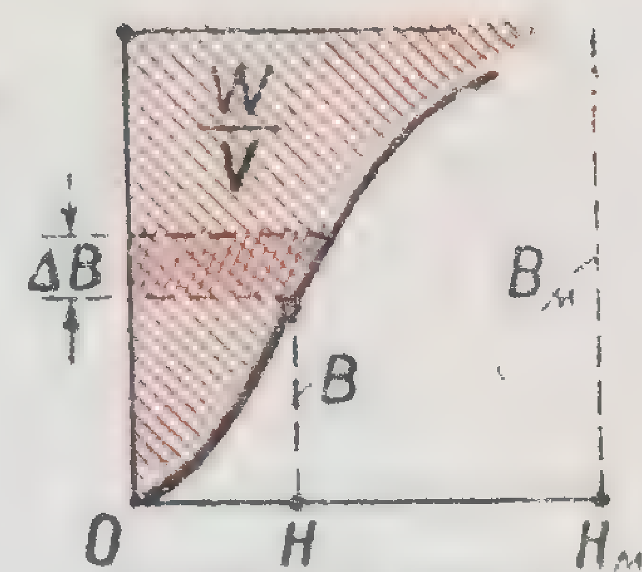


$$W = \sum_{0}^{\Psi} i\,\Delta\psi \quad \text{дж}$$

Расход энергии при намагничении.

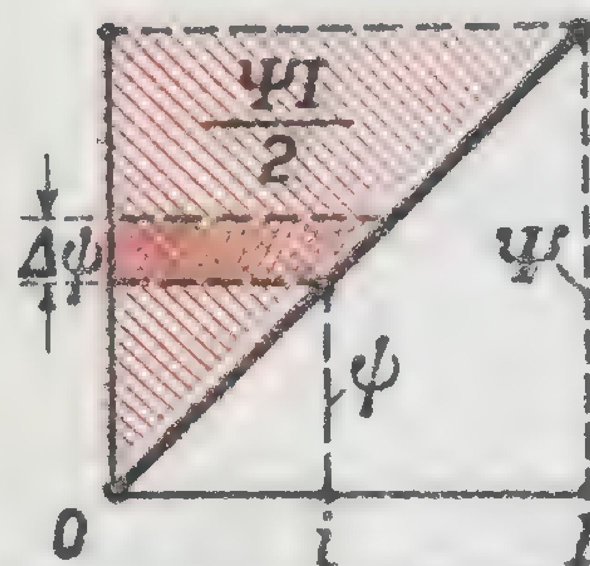


Однородное поле тороида



$$\frac{W}{V} = \sum_{0}^{B_м} H\,\Delta B \quad \frac{дж}{м^3}$$

Расход энергии, отнесенный к единице объема

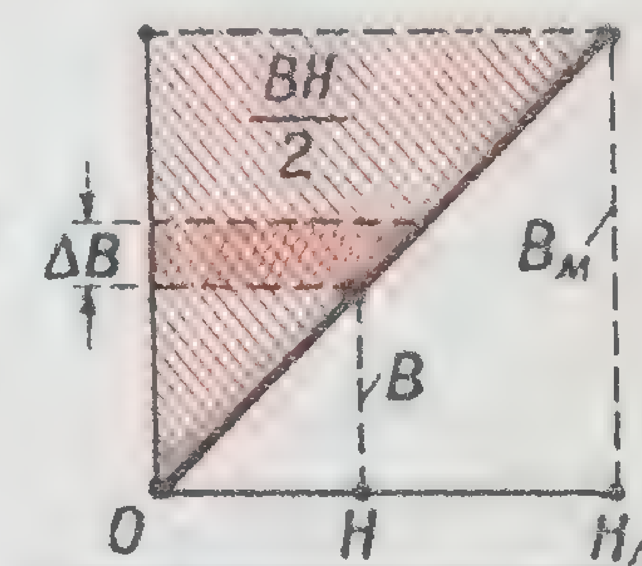


$$W = \frac{\Psi I}{2} = \frac{\Phi I w}{2} = \frac{BH}{2} S l \quad \text{дж}$$

Энергия однородного поля тороида

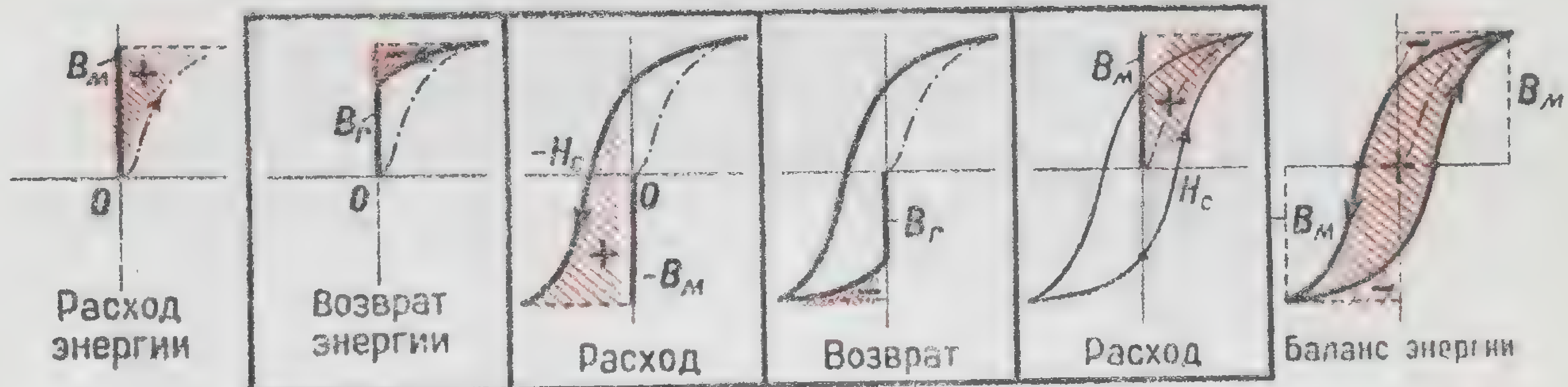
$$W = \sum \frac{\Psi I}{2} = \sum \frac{BH}{2} \Delta V \quad \text{дж}$$

Энергия магнитного поля (для среды с постоянной проницаемостью)

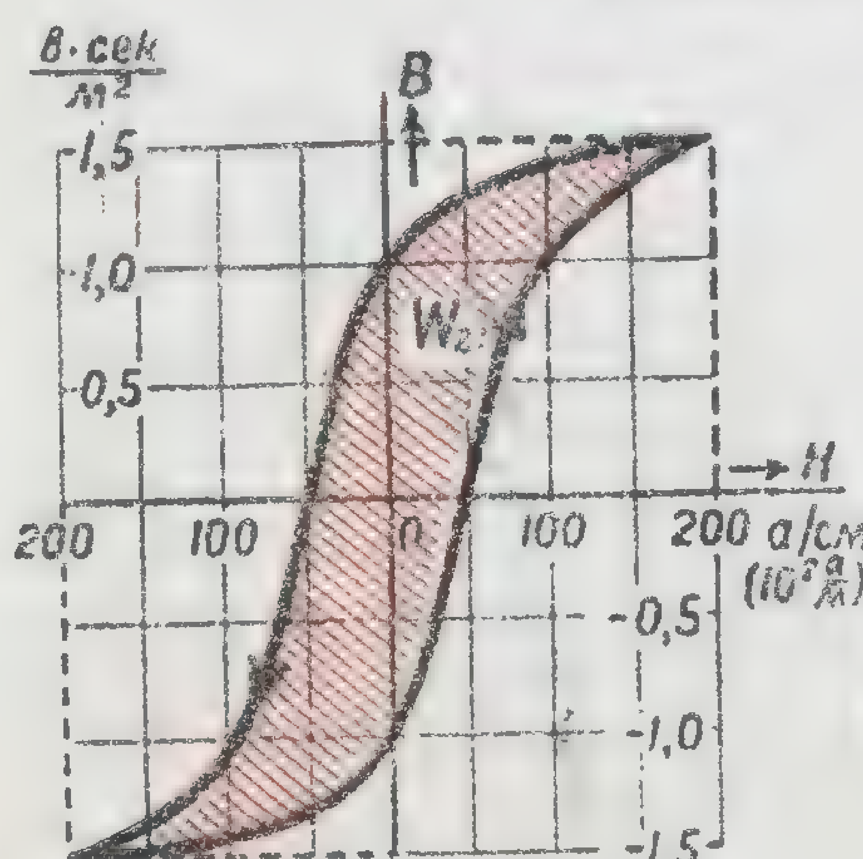


$$\frac{W}{V} = \frac{BH}{2} \quad \frac{дж}{м^3}$$

Объемная плотность энергии



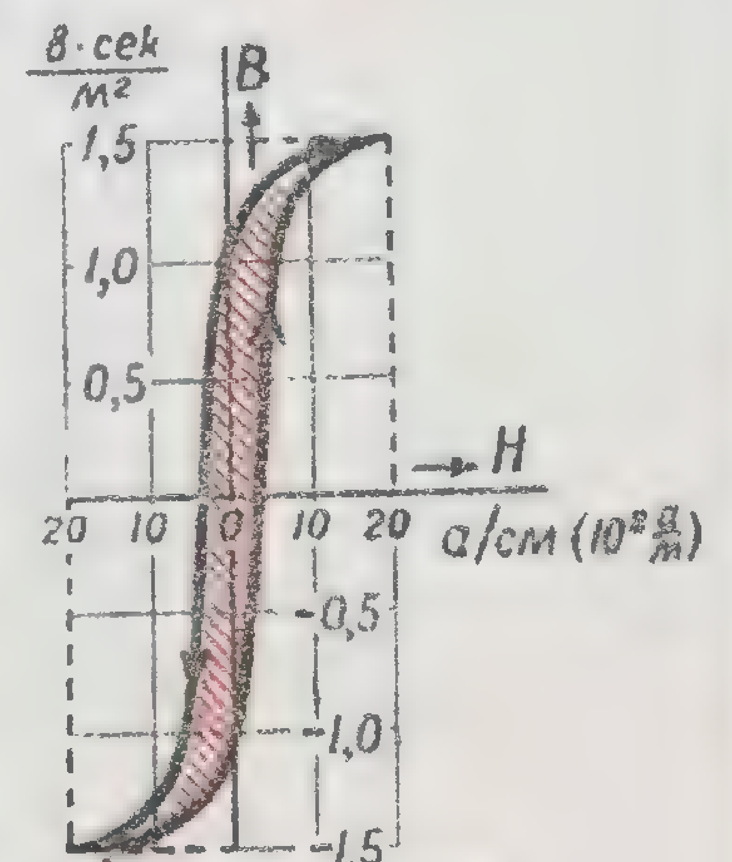
Баланс энергии за один цикл перемагничивания



Петля гистерезиса хромистой стали (большие потери)

$$W_г \equiv \sum_{B_м}^{B_м} H\,\Delta B \quad \frac{дж}{м^3}$$

Потеря энергии на гистерезис за один цикл перемагничивания **пропорциональна площади петли гистерезиса**

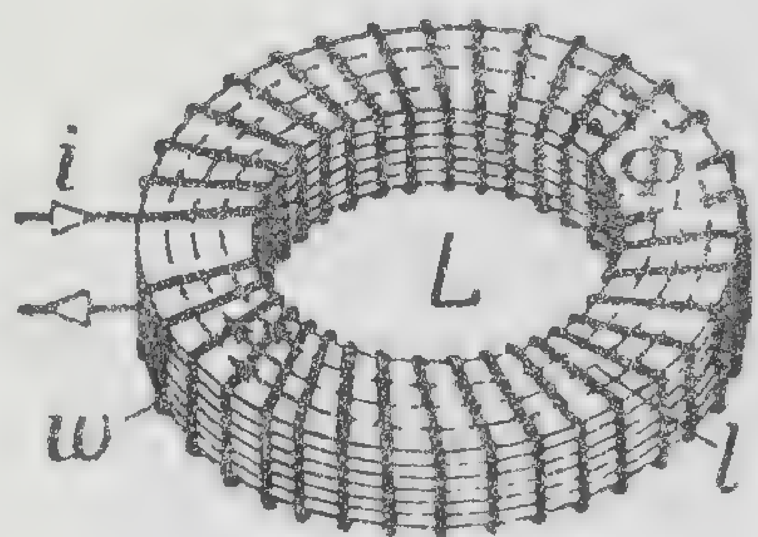


Петля гистерезиса стального литья (малые потери)

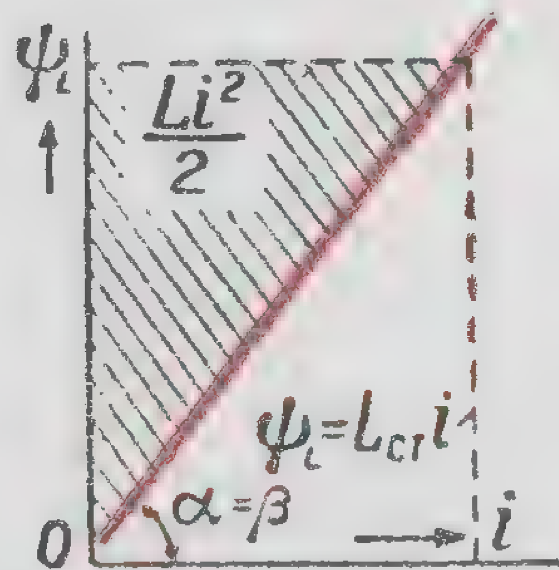
Потеря энергии в стали на гистерезис

З. И. Расовский.

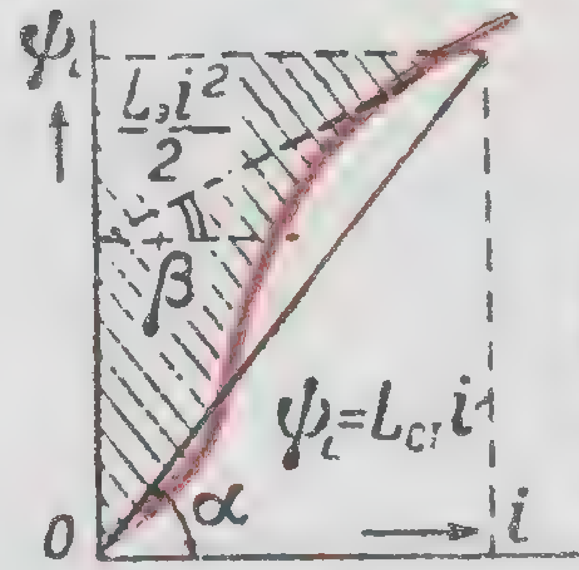
САМОИНДУКЦИЯ



Тороид с током

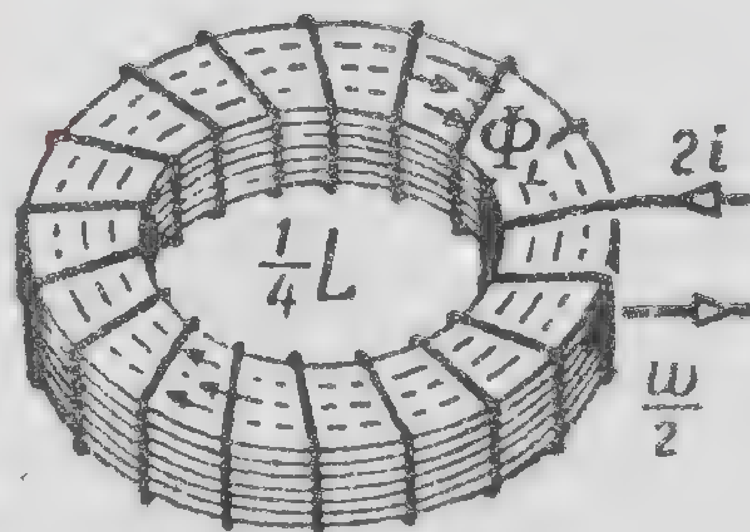


Нет насыщения



Сердечник насыщен

Магнитные характеристики



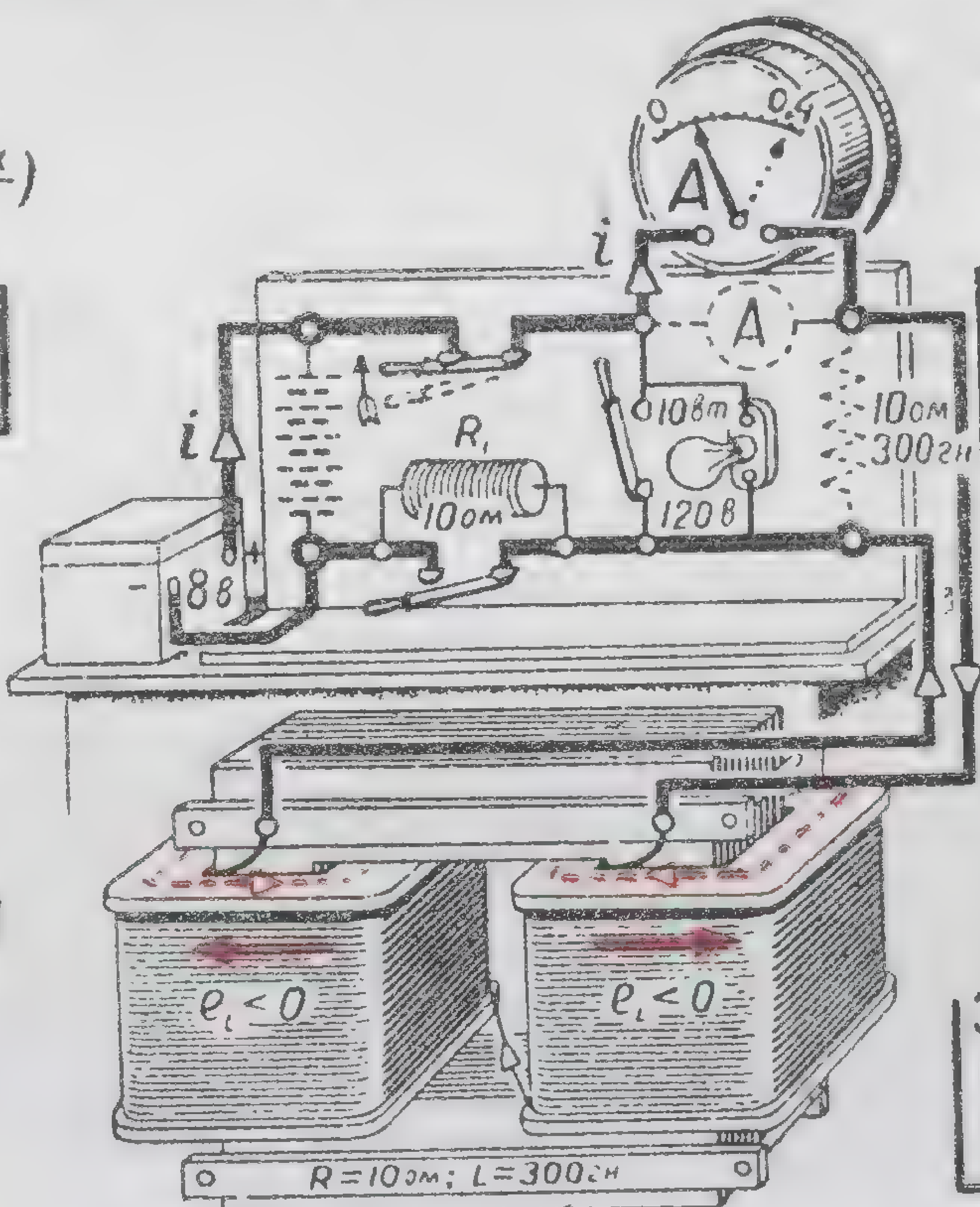
Тороид с двойным током и половинным числом витков

$$L_{cm} = \frac{\psi_i}{i} (tg\alpha) \quad гн \left(\frac{в\,сек}{а}\right)$$

Статическая индуктивность контура измеряется отношением его потокосцепления к току

$$L_д = \frac{e_L}{-di/dt} = \frac{d\psi_L}{di} (tg\beta) \quad гн \left(\frac{в}{а/сек}\right)$$

Динамическая индуктивность контура измеряется отношением наводимой э.д.с. к скорости изменения в нем тока



$$L = \frac{w\Phi}{i} = w^2 \frac{\mu S}{l} \quad гн$$

Индуктивность тороида

$$W_L = \frac{Li^2}{2} \quad дж$$

Энергия потока самоиндукции

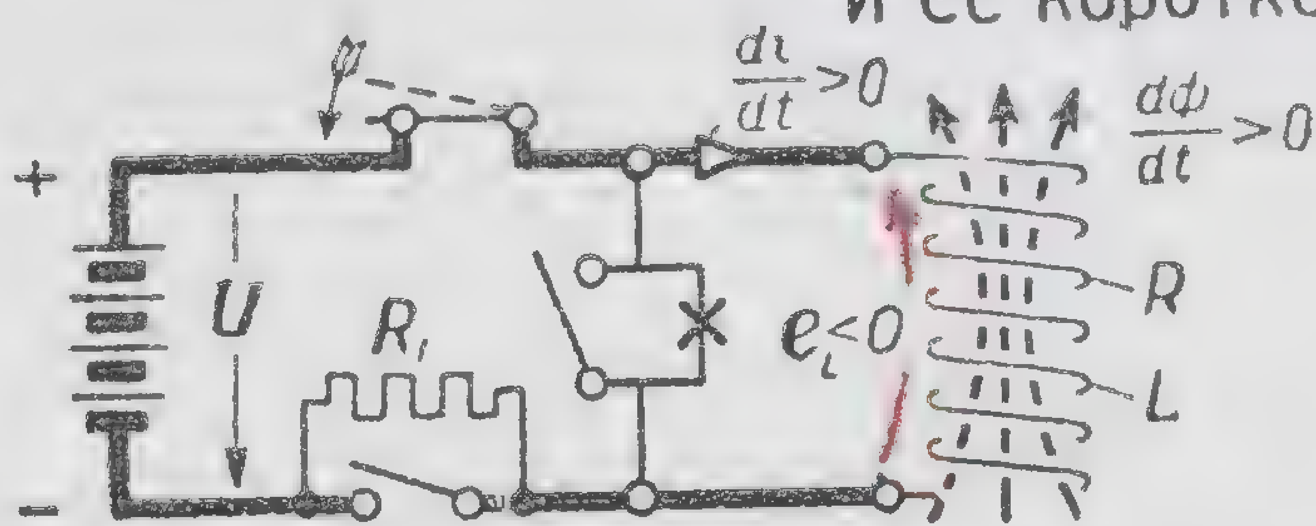
$$e_L = -\frac{d\psi_L}{dt} = -L\frac{di}{dt} \quad в$$

Электродвижущая сила самоиндукции

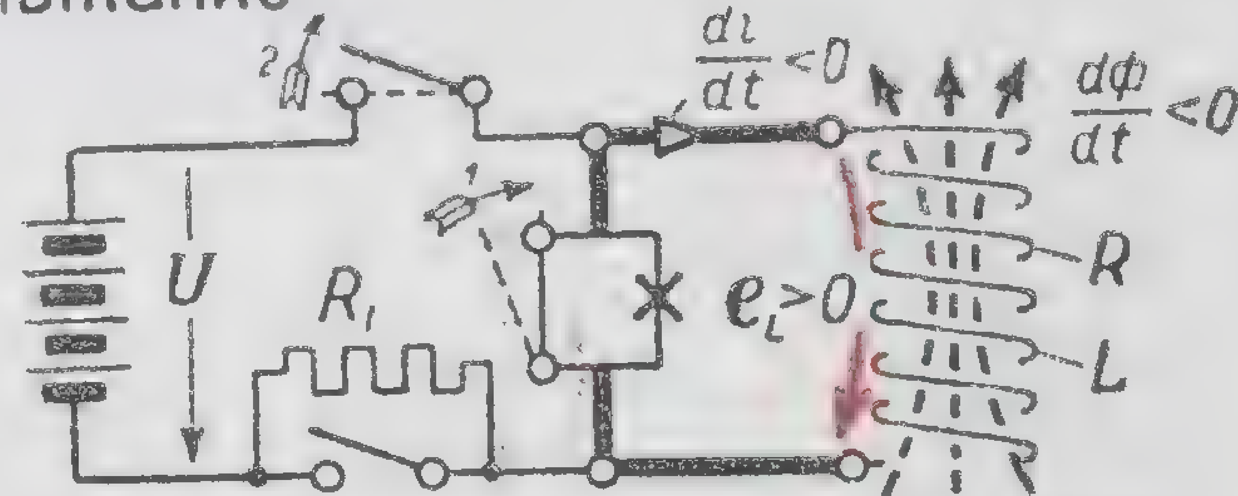
$$L_э = 2\frac{W_L}{i^2} \quad гн \left(\frac{дж}{а^2}\right)$$

Энергетическая индуктивность контура измеряется удвоенной энергией потока самоиндукции, отнесенной к квадрату тока

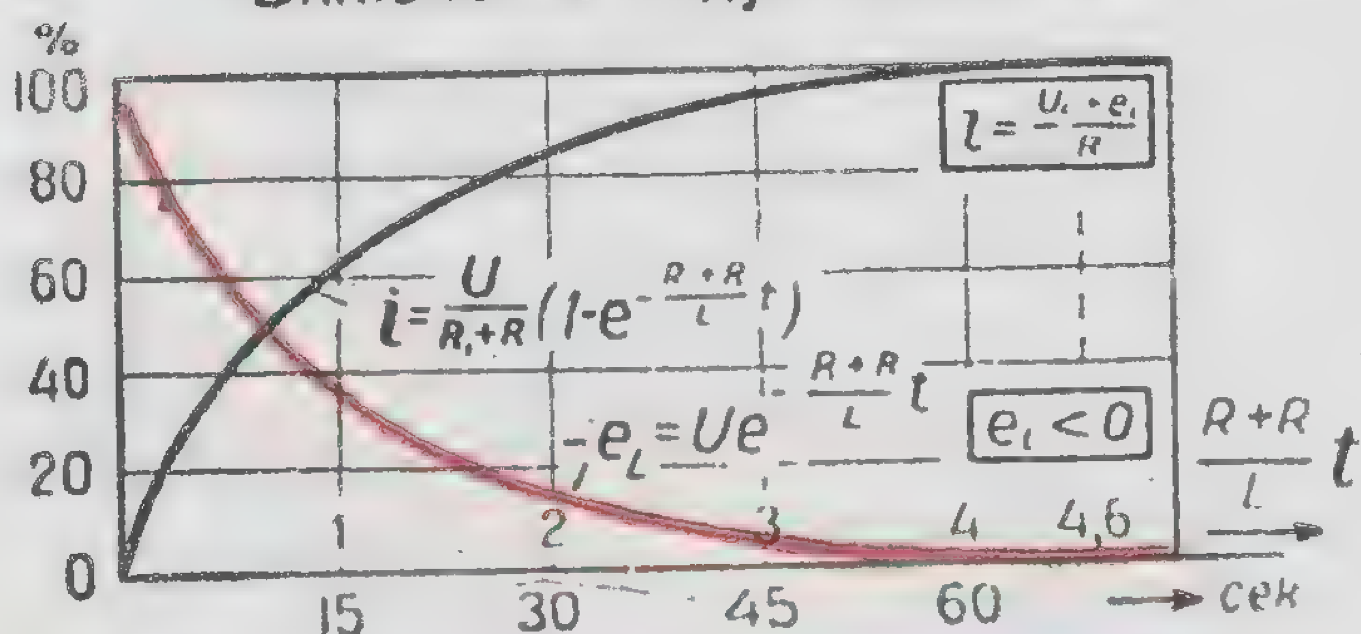
включение индуктивности к постоянному напряжению и ее короткое замыкание



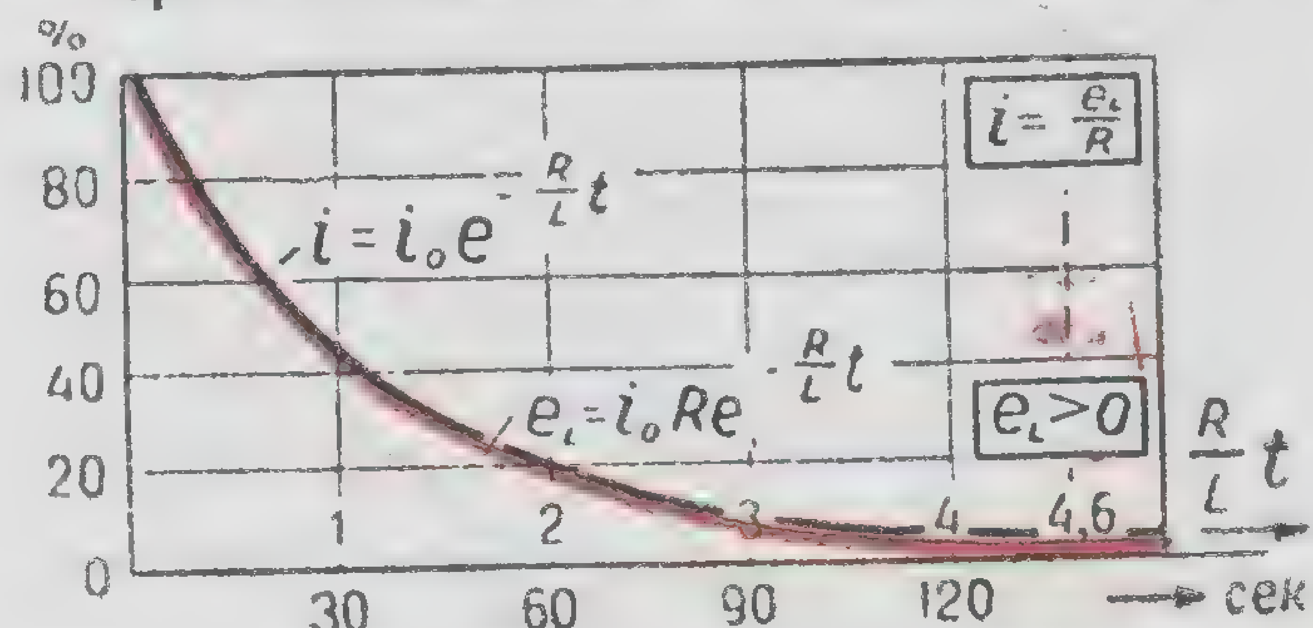
Включение индуктивности



Короткое замыкание индуктивности



э.д.с. направлена ПРОТИВ нарастающего тока

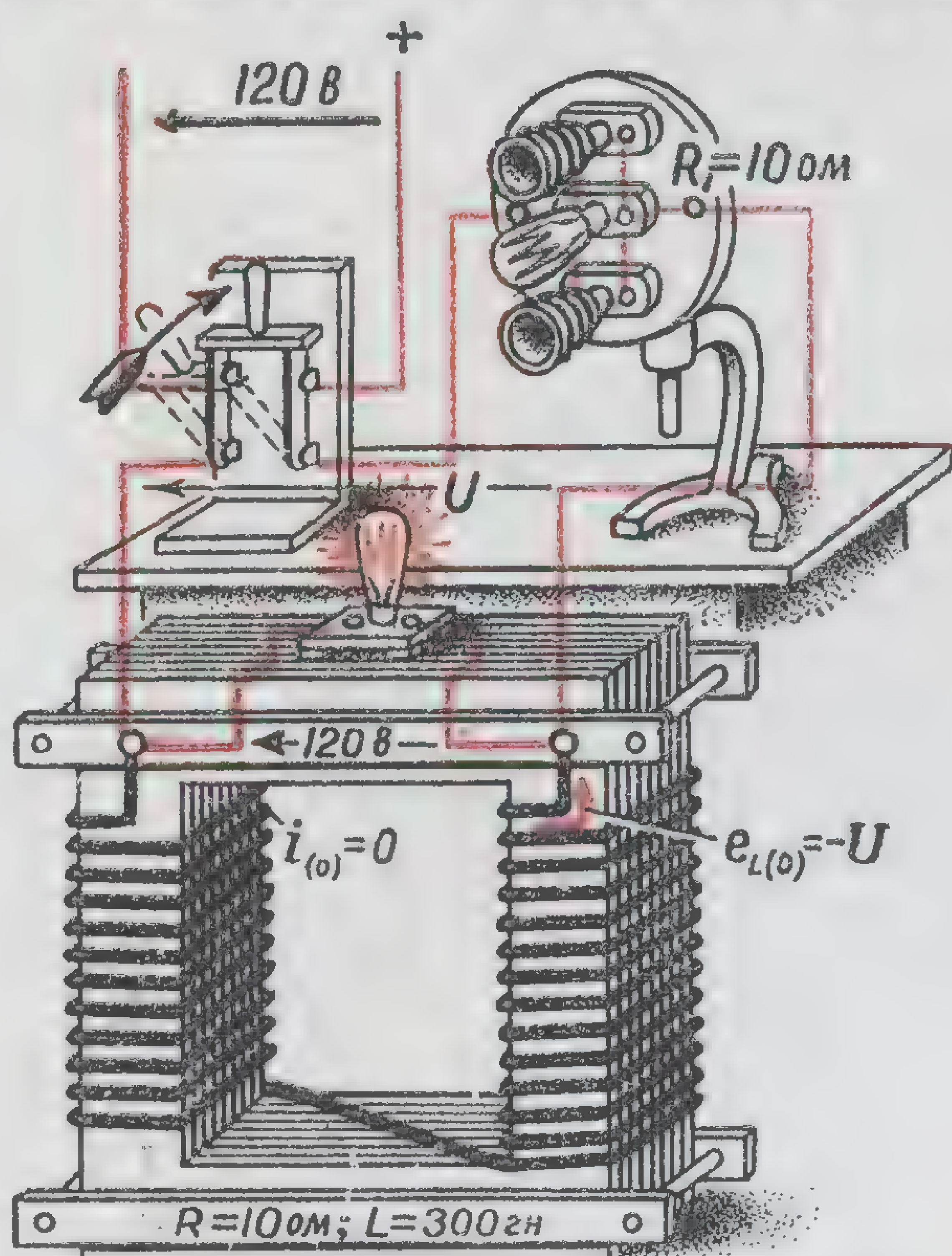


э.д.с. направлена ПО убывающему току

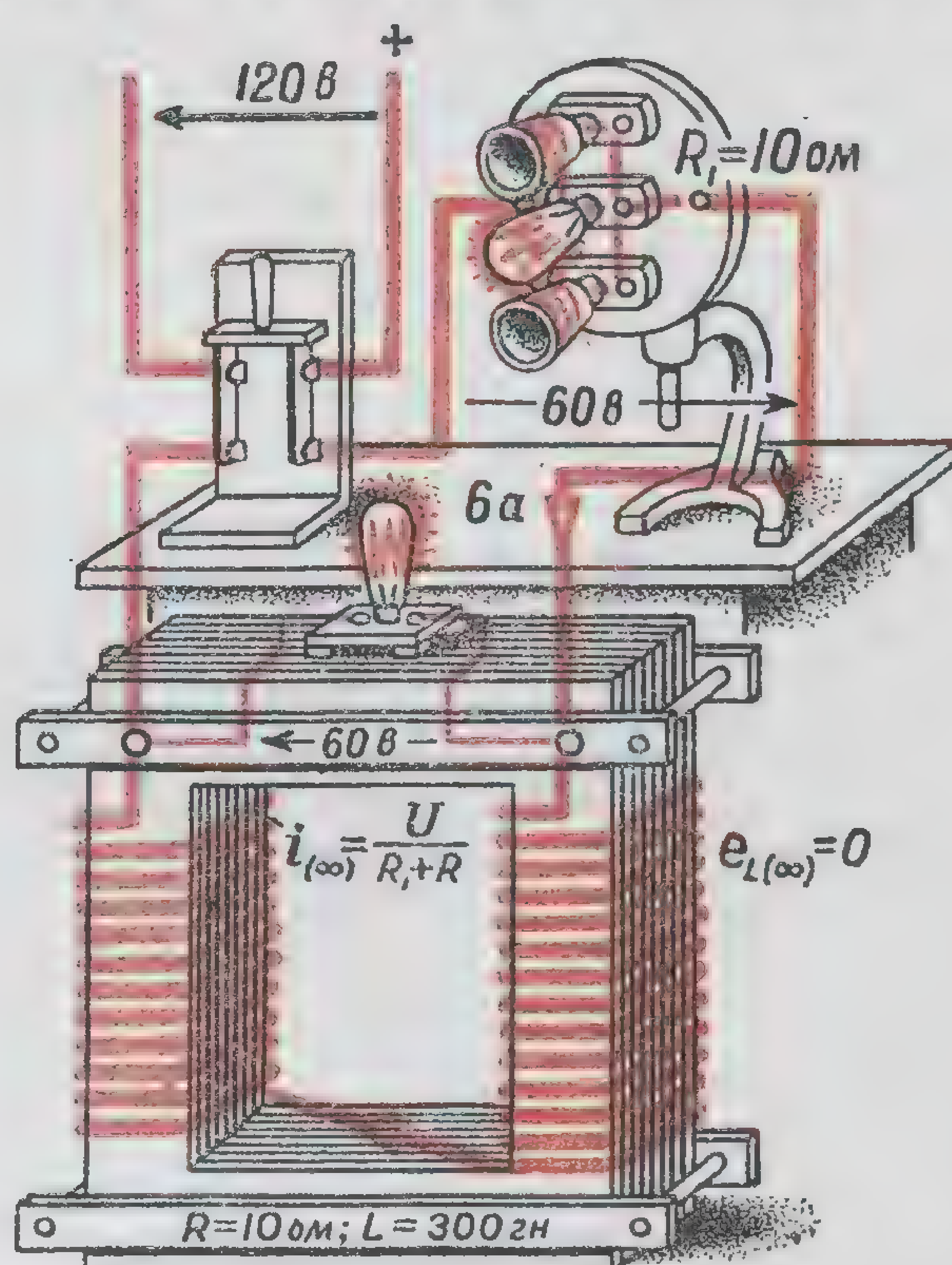
Э И Расовский

Худ. А. Меньшиков

ВКЛЮЧЕНИЕ И ВЫКЛЮЧЕНИЕ ЦЕПИ С ИНДУКТИВНОСТЬЮ

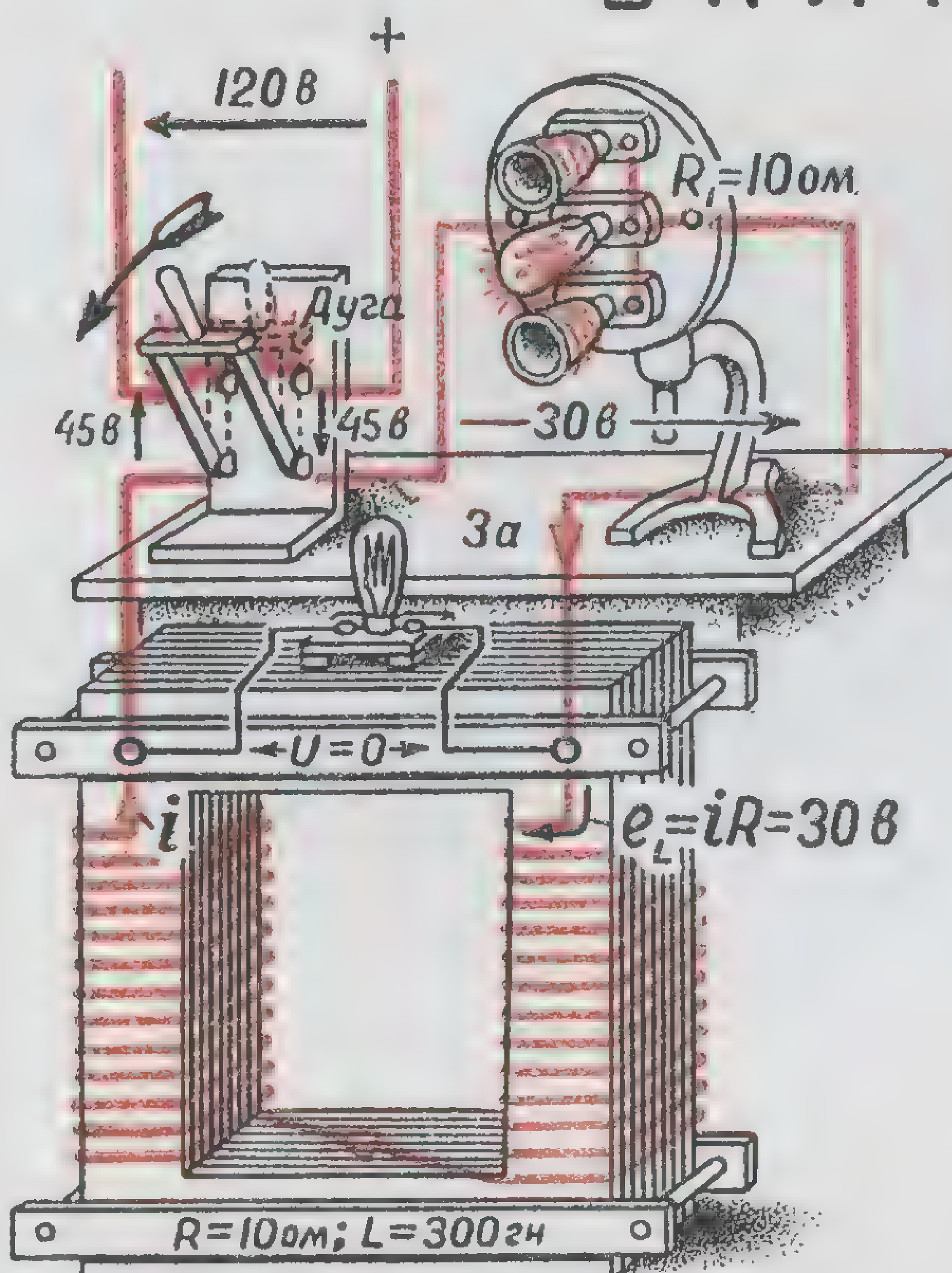


В момент включения ток равен нулю, а противо-э.д.с. самоиндукции равна приложенному напряжению

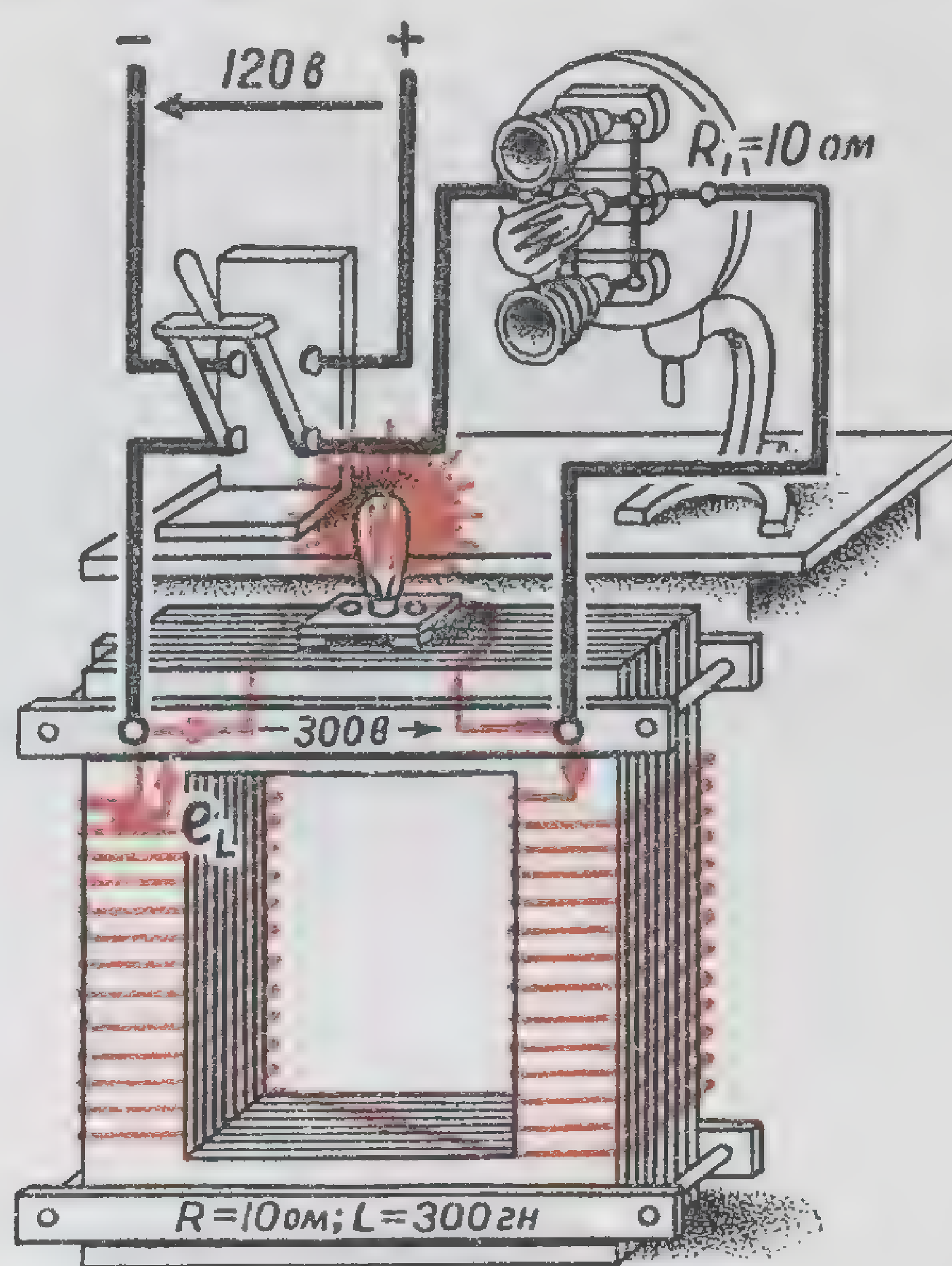


При установившемся токе э.д.с. самоиндукции отсутствует

ВКЛЮЧЕНИЕ



В процессе выключения образующаяся дуга замедляет спад тока



В момент обрыва дуги в обмотке возникает большая э.д.с. самоиндукции

ВЫКЛЮЧЕНИЕ

$W_L=\frac{BH}{2}V=\frac{Li^2}{2}$ дж

Энергия потока самоиндукции

Индуктивность — мера инерции электрического контура с током

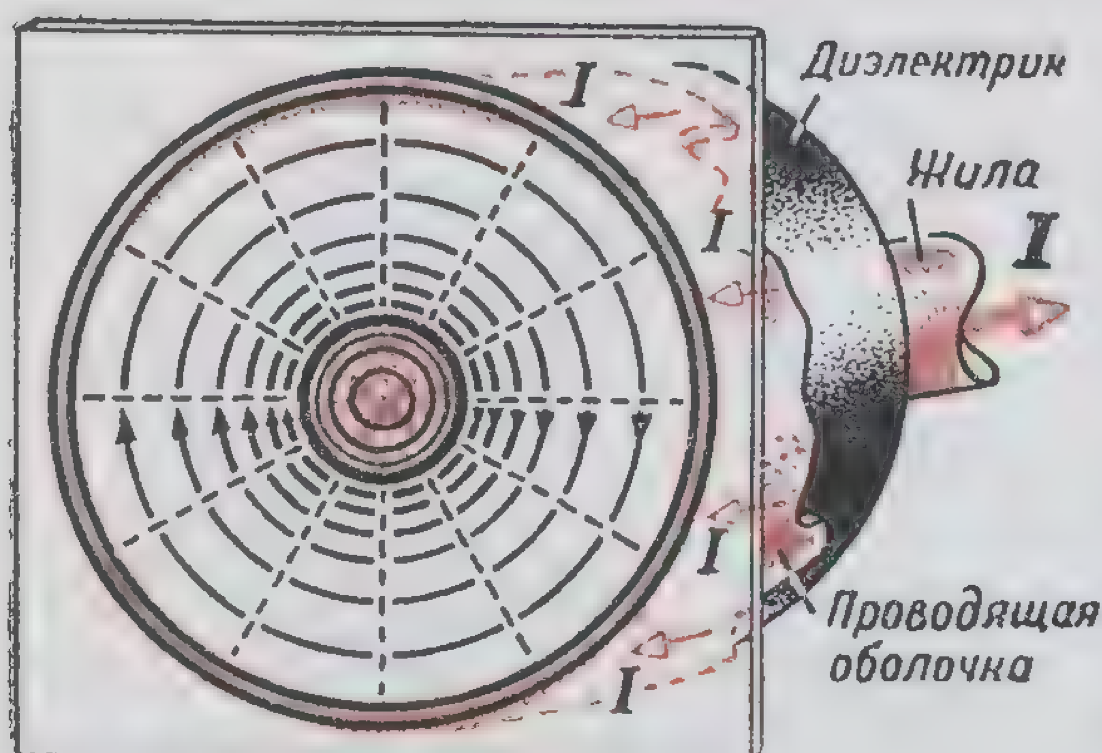
$W=\frac{mv^2}{2}$ дж

Кинетическая энергия движущегося тела

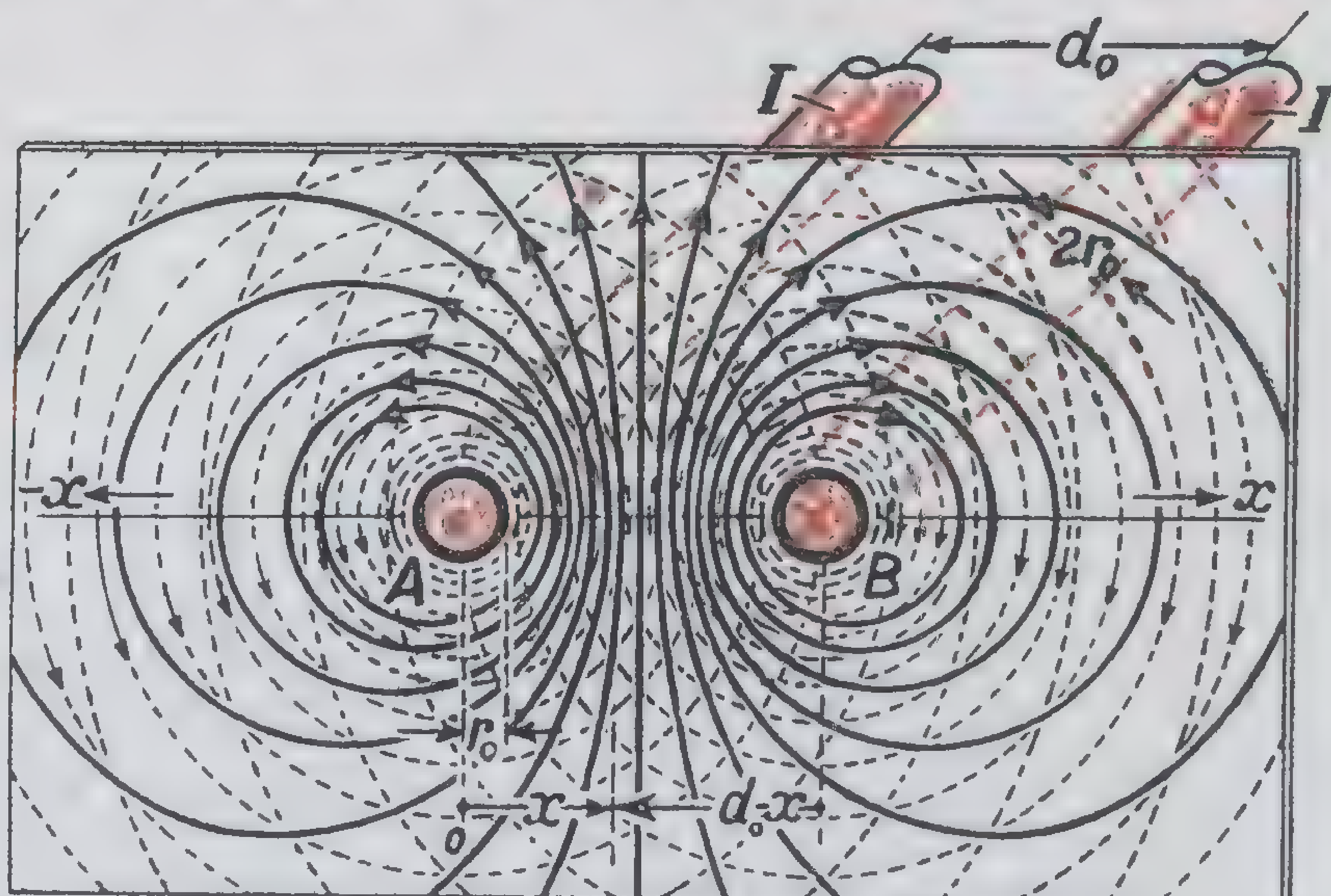
Э. И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

ИНДУКТИВНОСТЬ КАБЕЛЯ И ДВУХПРОВОДНОЙ ЛИНИИ



Магнитное поле коаксиального кабеля



Магнитное поле двухпроводной линии как результат наложения полей обоих проводов



$$H_x=H_x'+H_x''=\frac{I}{2\pi x}+\frac{I}{2\pi(d_o-x)}\ \frac{a}{м}$$

Напряженность поля вдоль горизонтальной оси

$$H_1=\frac{I}{2\pi a^2}X=\frac{\delta}{2}X\ \frac{a}{м}$$

$$H_2=\frac{I}{2\pi X}\ \frac{a}{м}$$

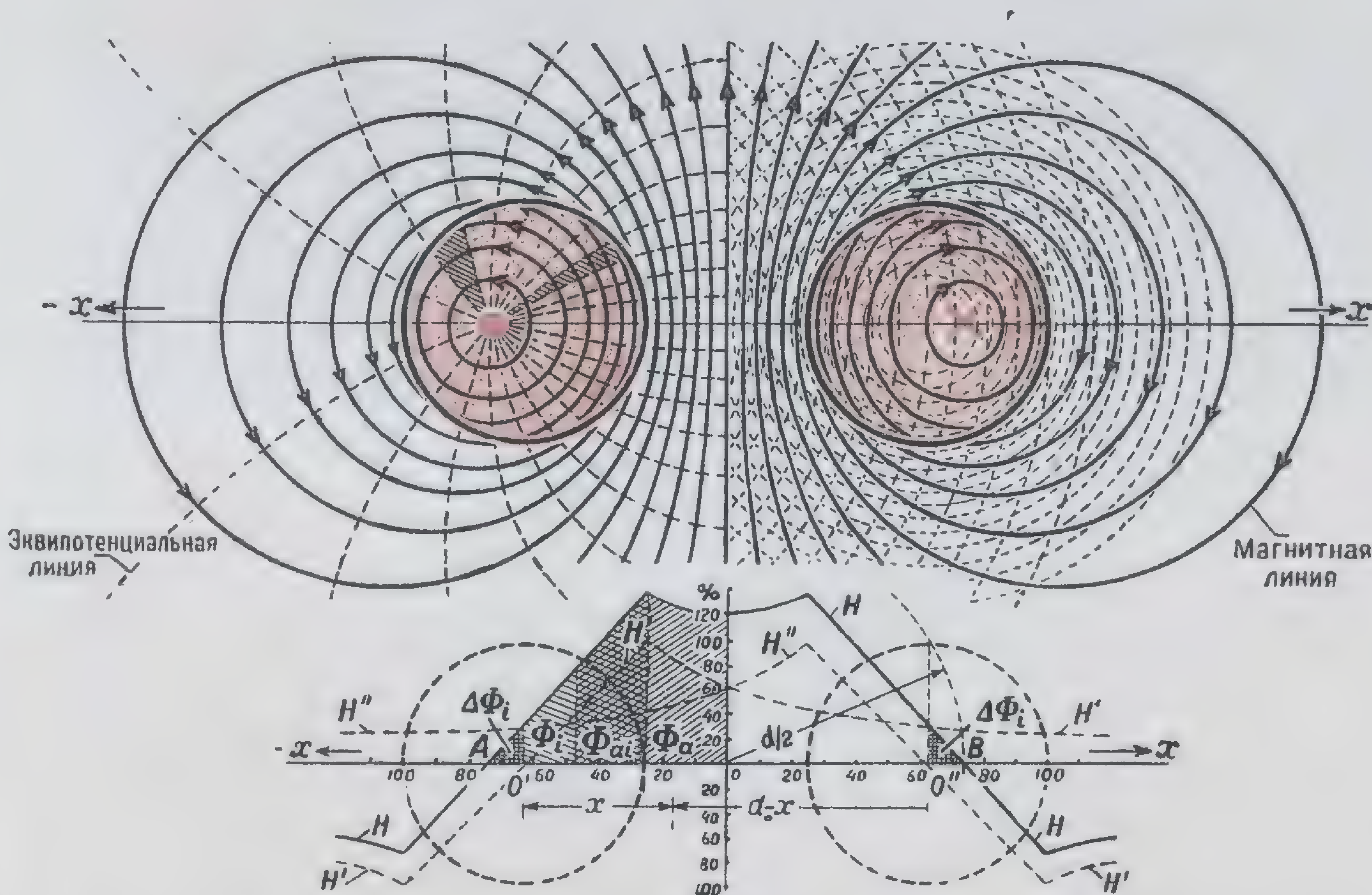
Напряженность магнитного поля в жиле кабеля и его диэлектрике

$$L_{AB}=0{,}1+0{,}4\ln\frac{d_o}{r_o}\ \frac{мгн}{км}$$

Индуктивность двухпроводной линии

$$L_A=\frac{L_{AB}}{2}=0{,}05+0{,}2\ln\frac{d_o}{r_o}\ \frac{мгн}{км}$$

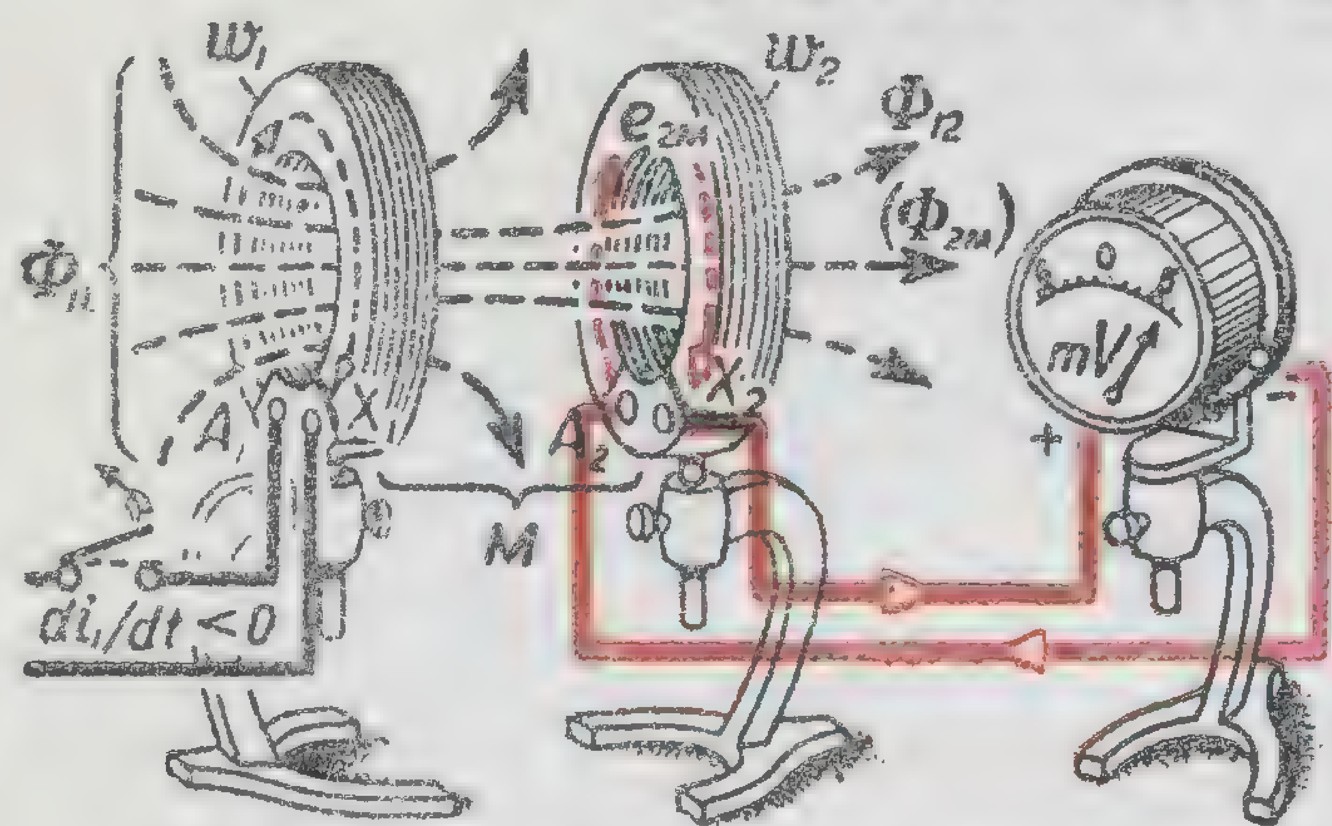
Рабочая индуктивность одного провода



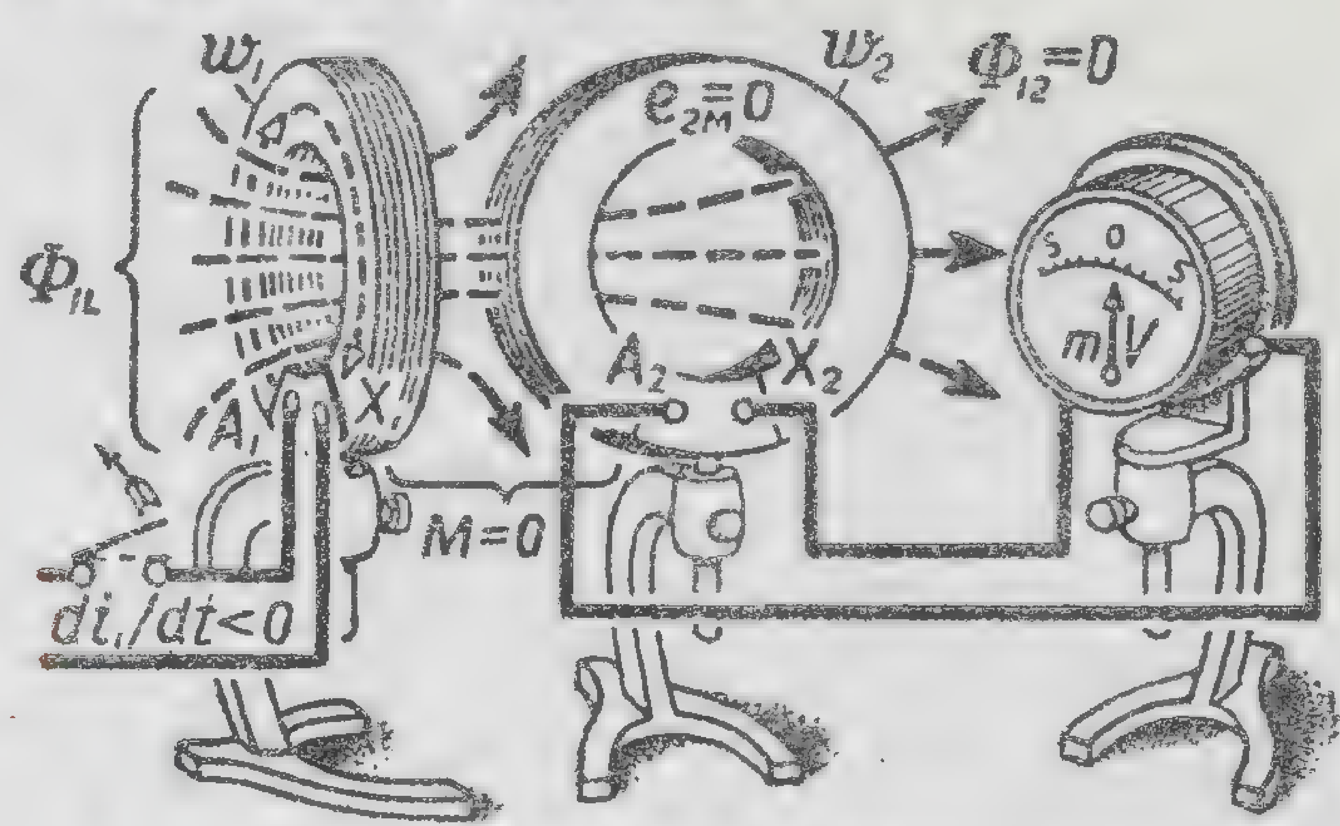
Магнитное поле двух параллельных цилиндров с постоянным током

Э. И. Расовский

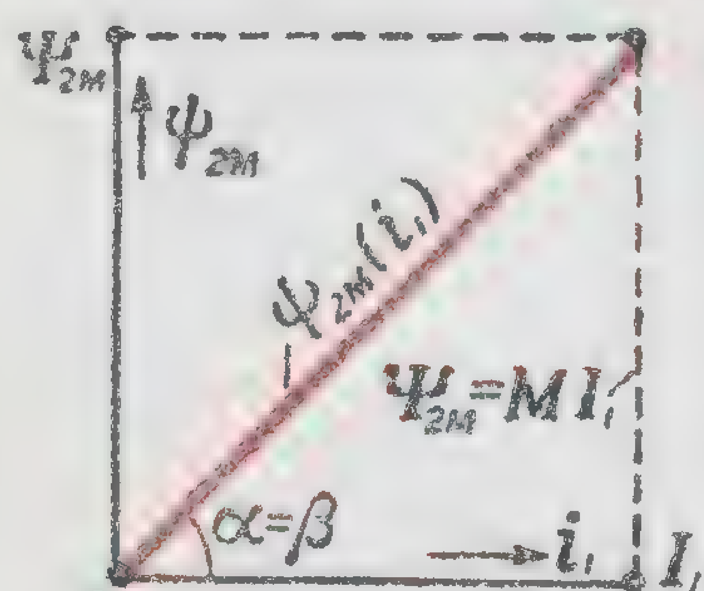
ВЗАИМОИНДУКЦИЯ



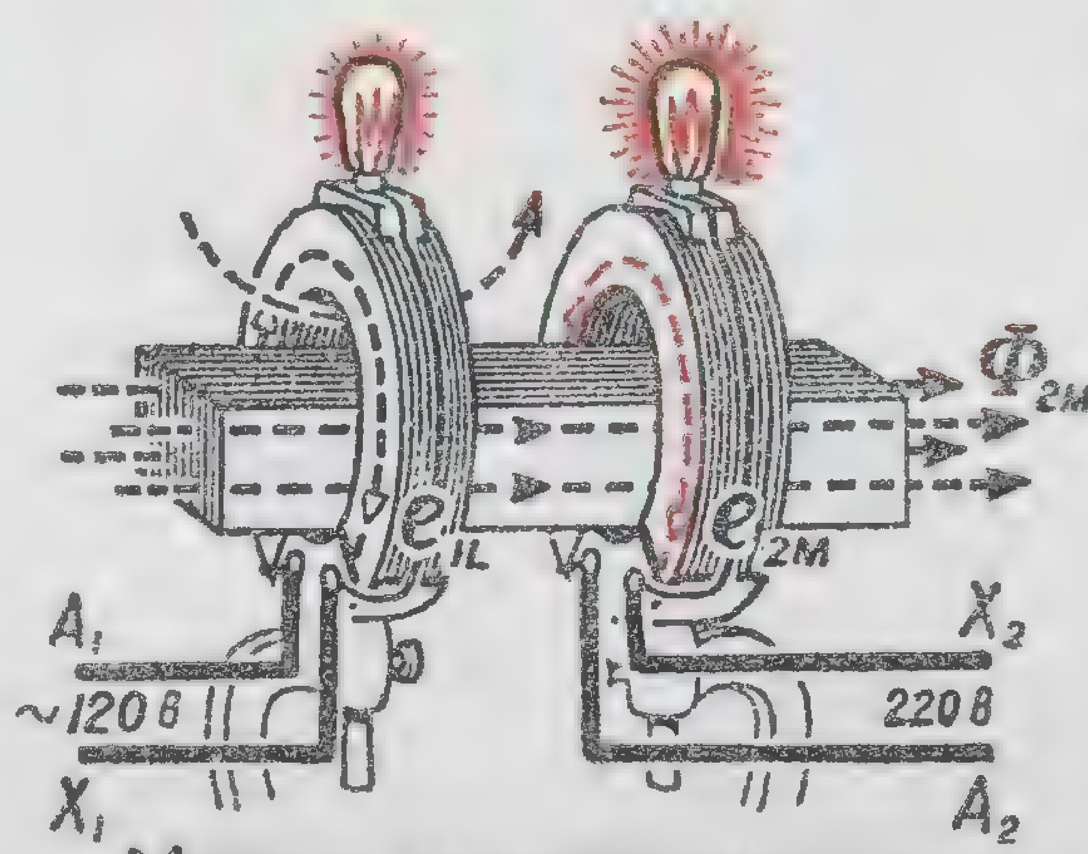
Индуктивно связанные катушки



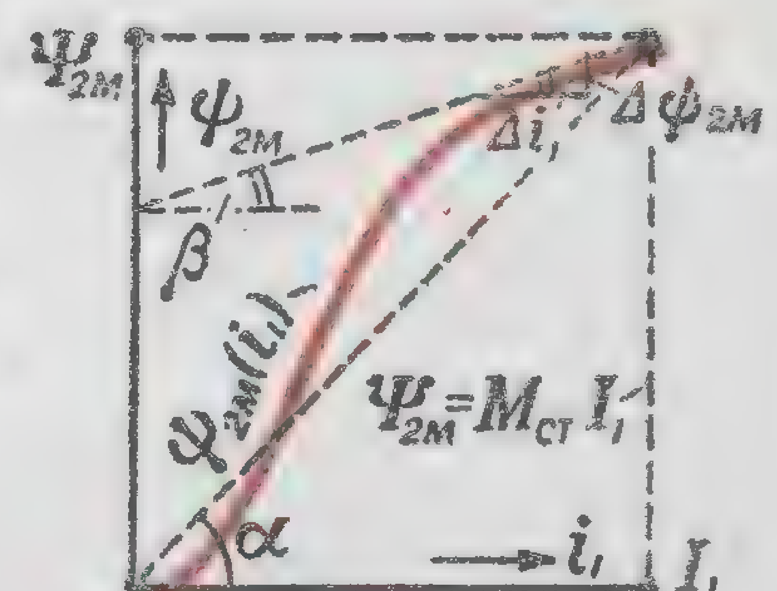
Взаимоиндукции нет



Зависимость потокосцепления от тока: $\psi_2(i_1)$.



Модель трансформатора



Зависимость $\psi_2(i_1)$ при наличии стального сердечника

$$M_{ст}=\frac{\Psi_{2м}}{I_1}(tg\alpha)\ гн$$

Статическая взаимоиндуктивность



Две обмотки, равномерно уложенные поверх тороида

$$e_{2м}=-\frac{d\psi_{2м}}{dt}\ в$$

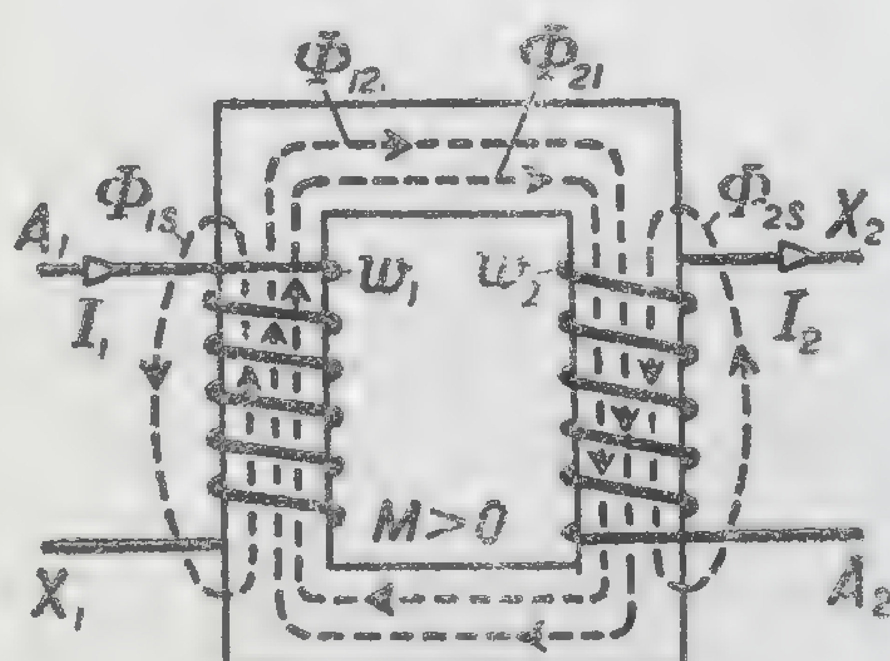
ЭДС взаимоиндукции

$$M=\frac{w_2\Phi_{12}}{I_1}=\frac{w_1w_2}{l}\mu S=\frac{w_1w_2}{R_m}\ гн$$

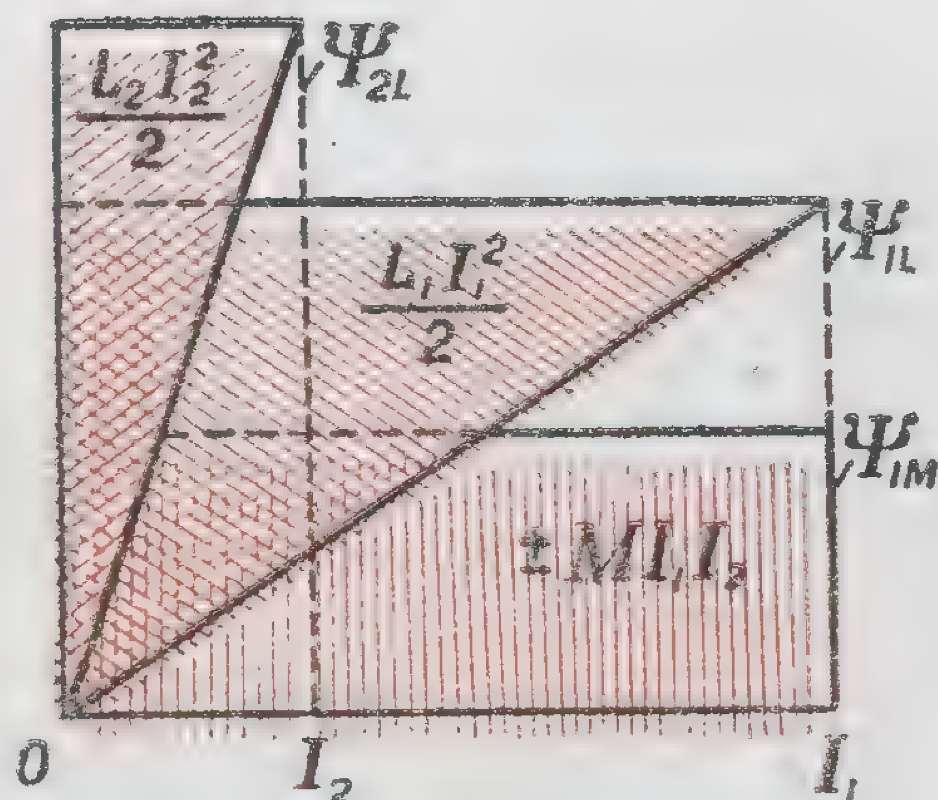
Взаимная индуктивность двух обмоток тороида

$$M_д=\frac{e_{2м}}{-di_1/dt}=\frac{d\psi_{2м}}{di_1}(tg\beta)\ гн$$

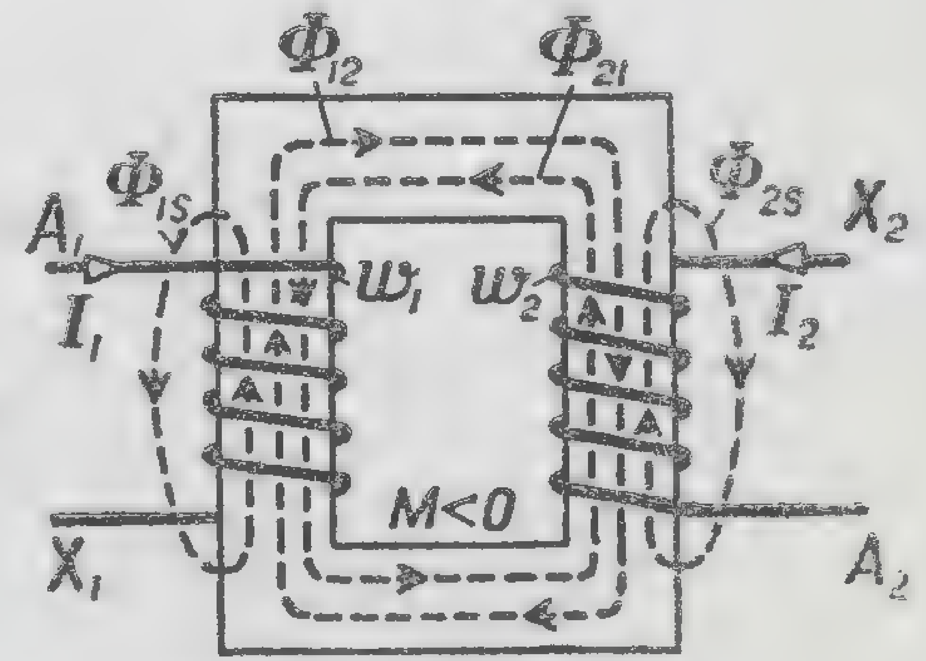
Динамическая взаимоиндуктивность



Потоки взаимоиндукции совпадают: взаимоиндуктивность положительна



$$W_m=\Sigma\frac{\Psi I}{2}=\frac{L_1I_1^2}{2}\pm MI_1I_2+\frac{L_2I_2^2}{2}\ дж$$



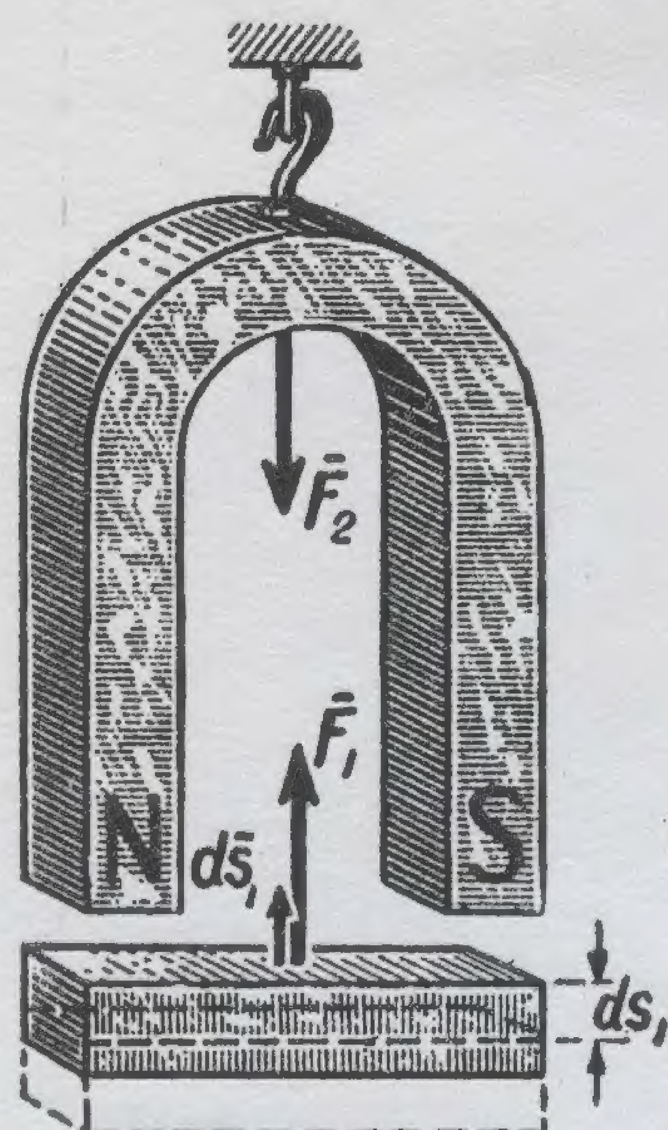
Потоки взаимоиндукции противонаправлены: взаимоиндуктивность отрицательна

Энергия магнитного поля двух обмоток

Э. И. Расовский.

Худ. А. Меньшиков

МЕХАНИЧЕСКИЕ СИЛЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ (ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ СИЛЫ)

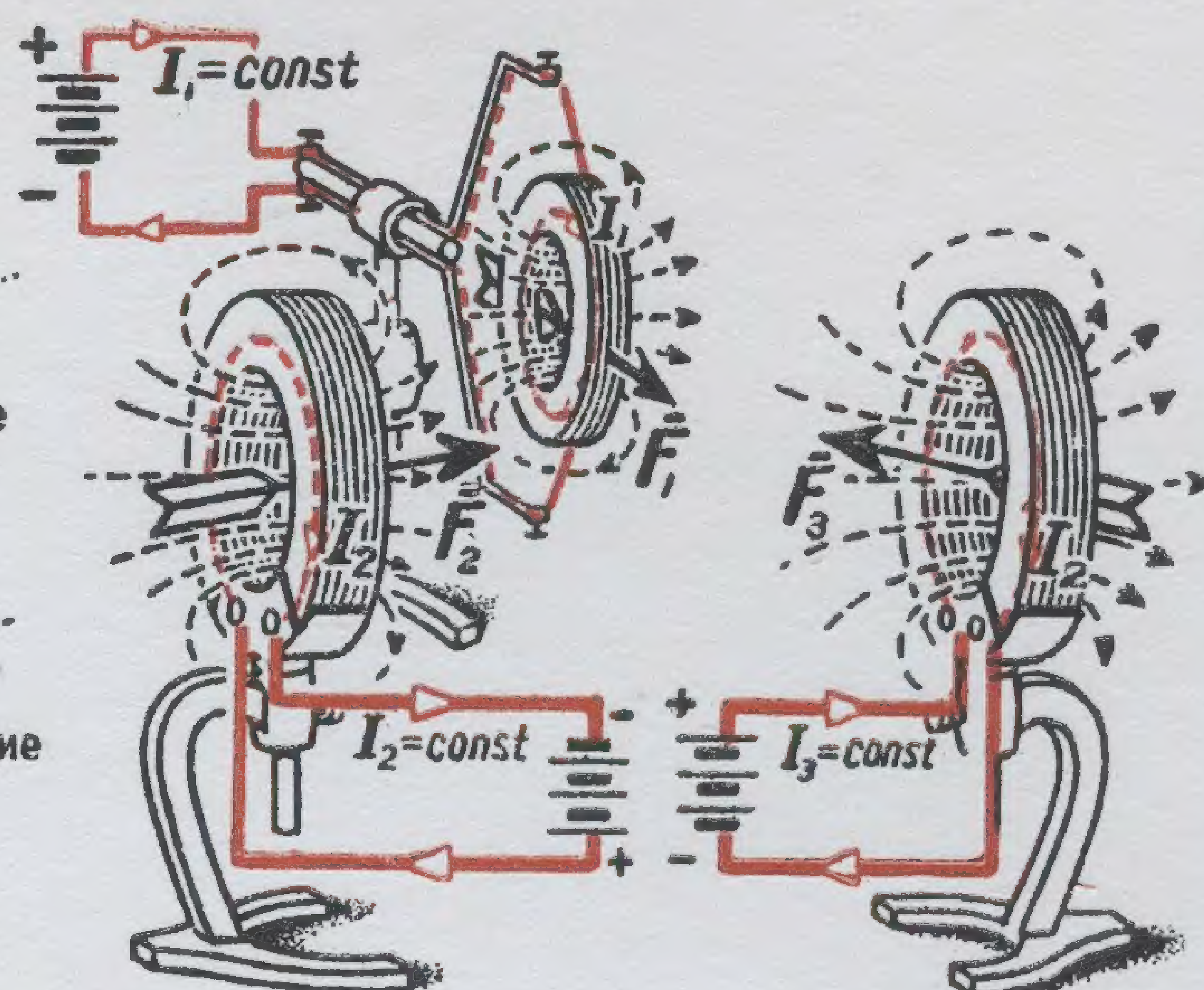




Электромагнитные силы в изолированной системе

$$dA = \bar{F}_1 d\bar{s}_1 + \bar{F}_2 d\bar{s}_2 + \cdots = -dW_m \quad дж$$

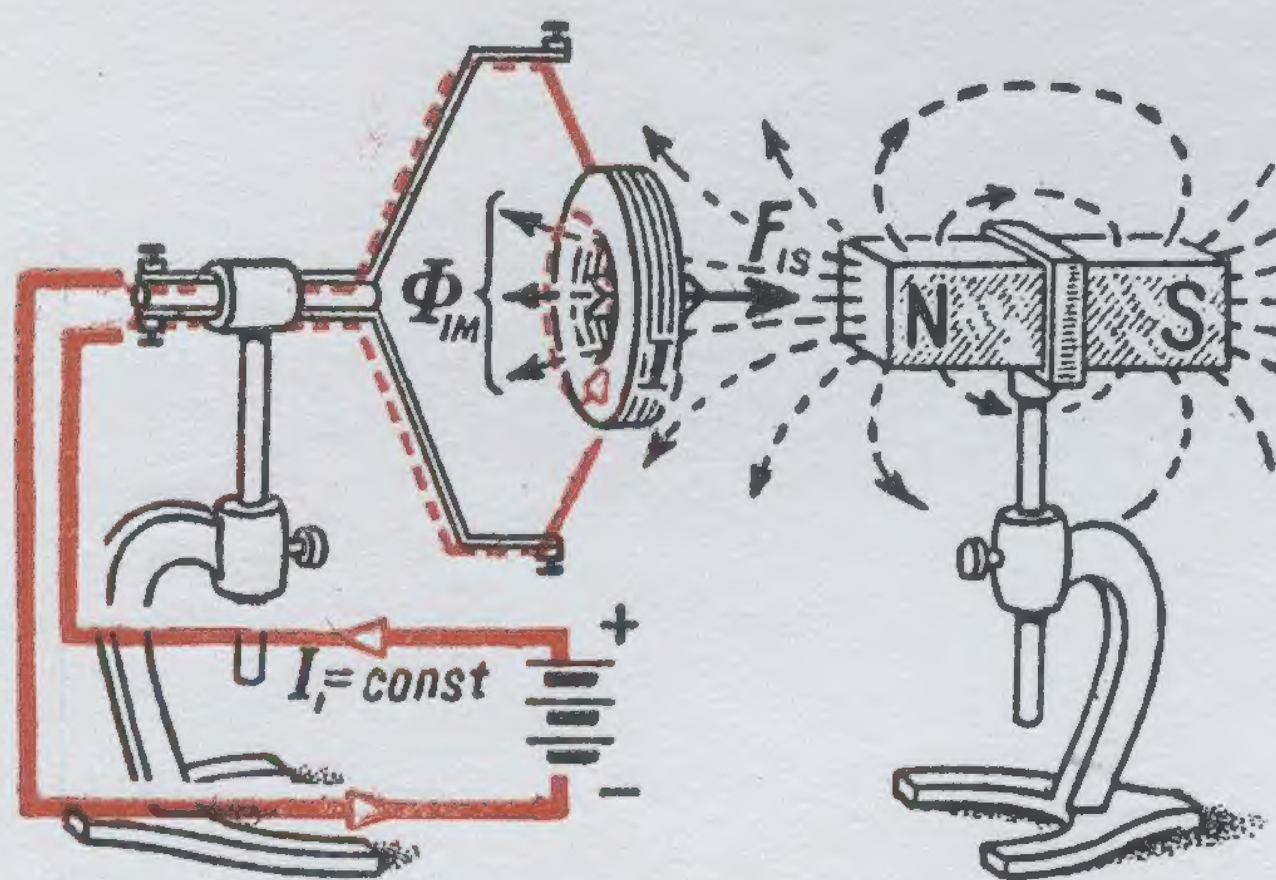
Работа электромагнитных сил при отсутствии электрических источников равна **убыли** энергии магнитного поля системы



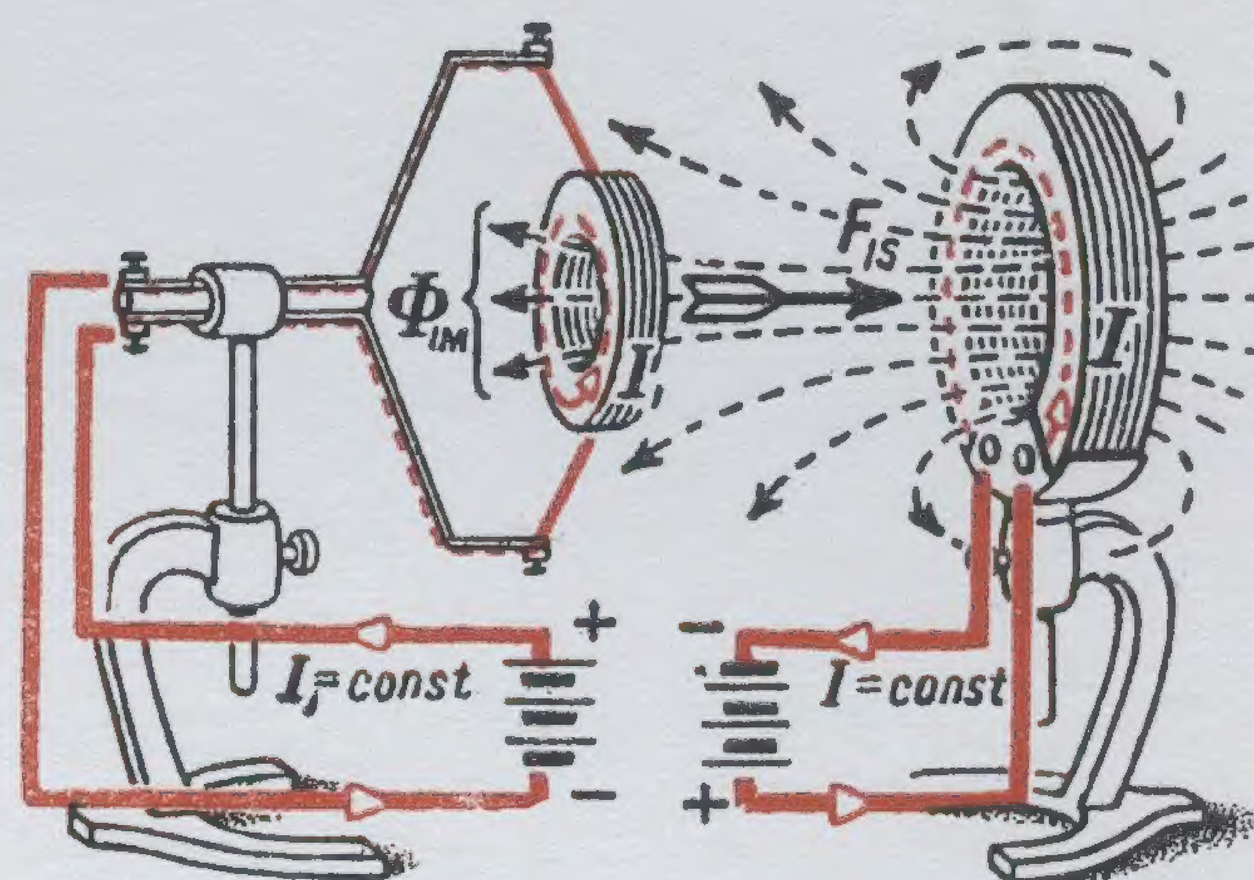
Электромагнитные силы в системе с неизменными токами

$$dA = \bar{F}_1 d\bar{s}_1 + \bar{F}_2 d\bar{s}_2 + \cdots = \frac{I_1}{2} d\phi_1 + \frac{I_2}{2} d\phi_2 + \cdots = +dW_m \quad дж$$

Работа электромагнитных сил в системе с неизменными токами равна **приращению** энергии магнитного поля системы



Удобоподвижный контур с **неизменным** током в поле постоянного магнита



Удобоподвижный контур с **неизменным** током в поле катушки

$$F_{1S} = +\frac{dW_m}{ds_1} = \frac{d}{ds_1}(W_{1L} + W_{1M}) \quad \frac{дж}{м}$$

Электромагнитная сила „стремится" **увеличить** энергию системы

$$F_{1S} = \frac{I_1}{2}\frac{d\phi_{1L}}{ds_1} + I_1\frac{d\phi_{1M}}{ds_1} \quad \frac{дж}{м}$$

Электромагнитная сила „стремится" **увеличить** потоки само- и взаимоиндукции

$$F_{1S} = \frac{I_1^2}{2}\frac{dL_1}{ds_1} + \left(I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{ds_1} + I_1 I_3 \frac{dM_{13}}{ds_1} + \cdots\right) \quad \frac{дж}{м}$$

Электромагнитная сила „стремится" **увеличить** само- и взаимную индуктивность

$$F_{1S} = I_1 \frac{d\phi_{1M}}{ds_1} \quad \frac{дж}{м}$$

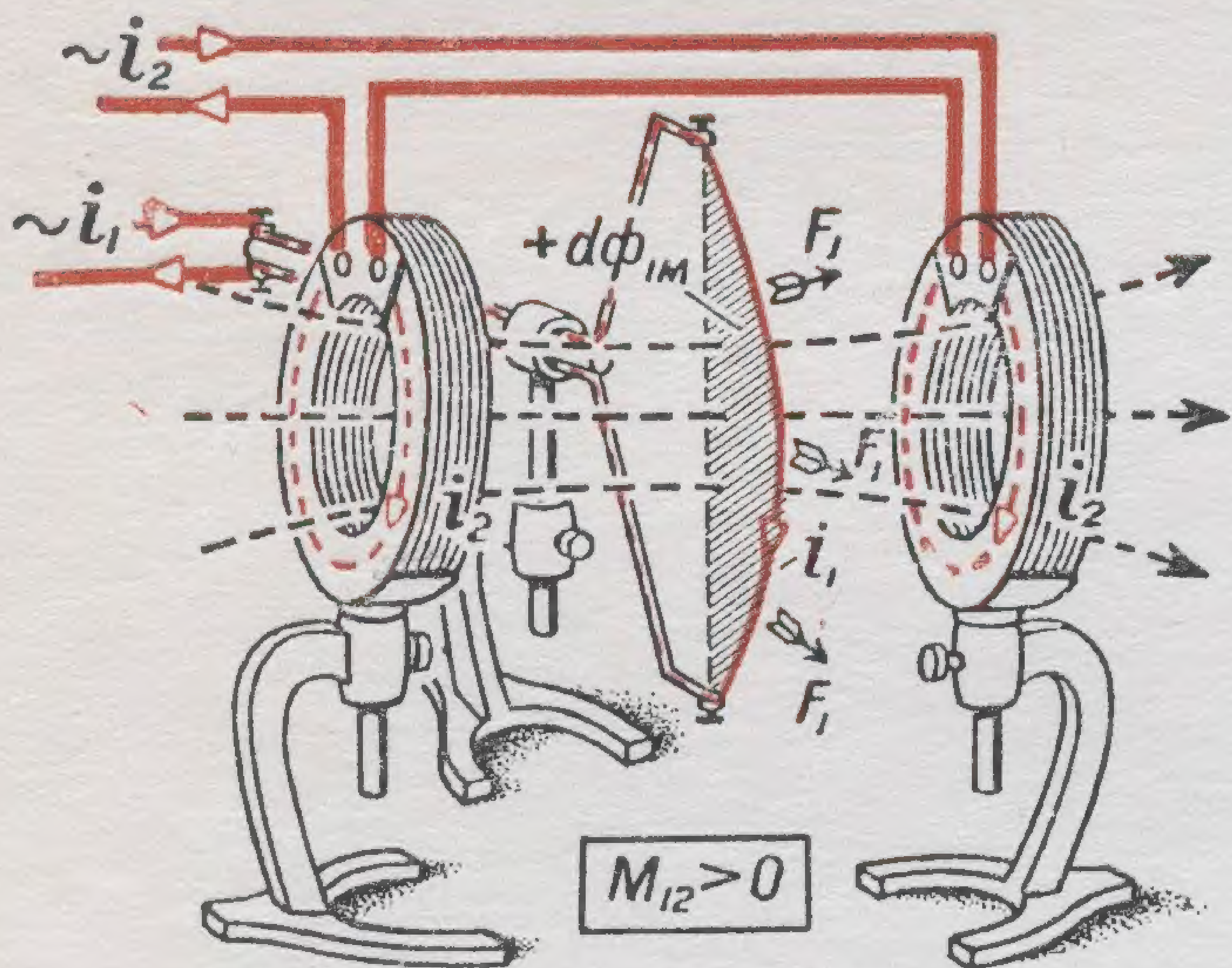
Сила, действующая на контур с током во внешнем магнитном поле

Контур с неизменным током „стремится" охватить наибольший внешний для него положительный магнитный поток

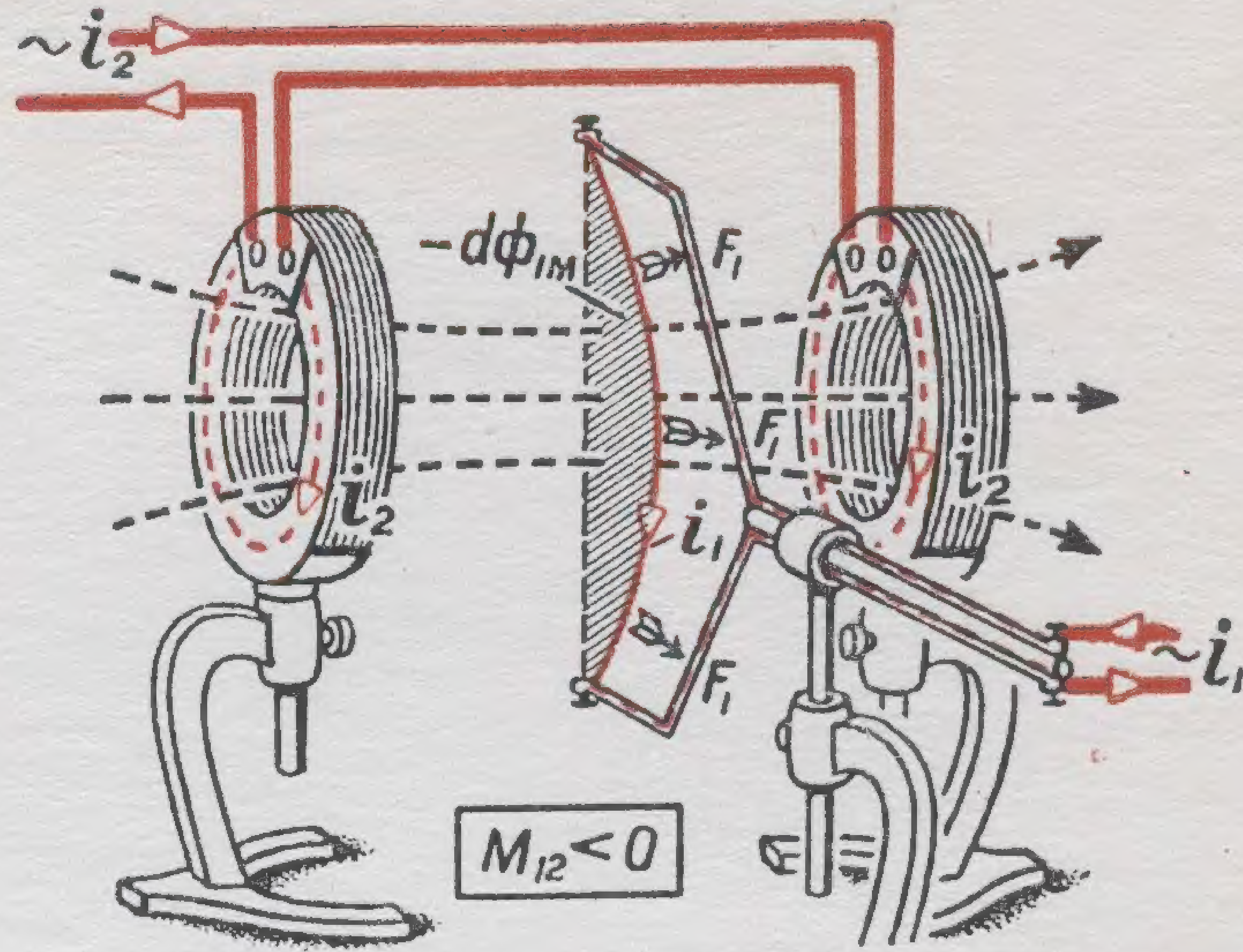
Правило Максвелла

Э.И Расовский

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ



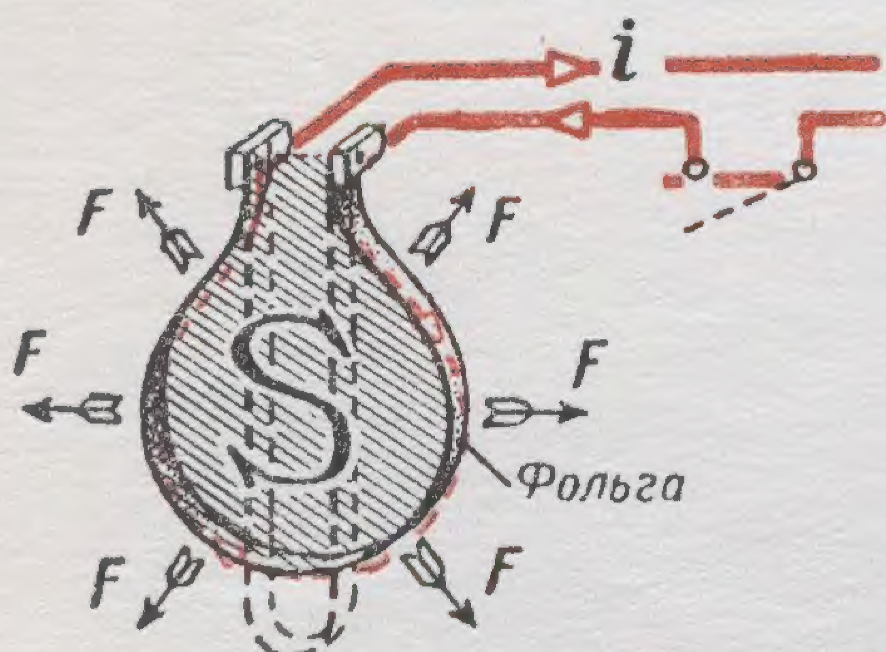
Увеличение положительной взаимной индуктивности



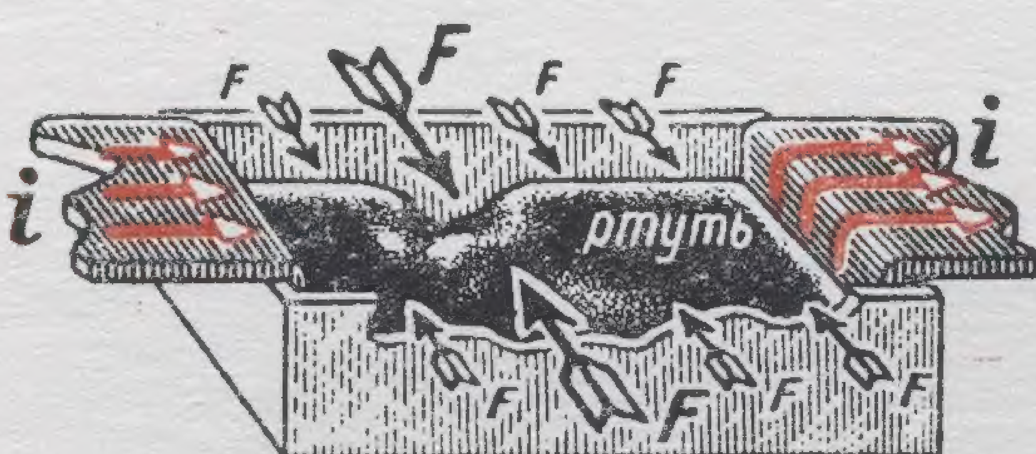
Уменьшение отрицательной взаимной индуктивности

$$F_{1s} = i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{ds_1} \quad \frac{дж}{м}$$

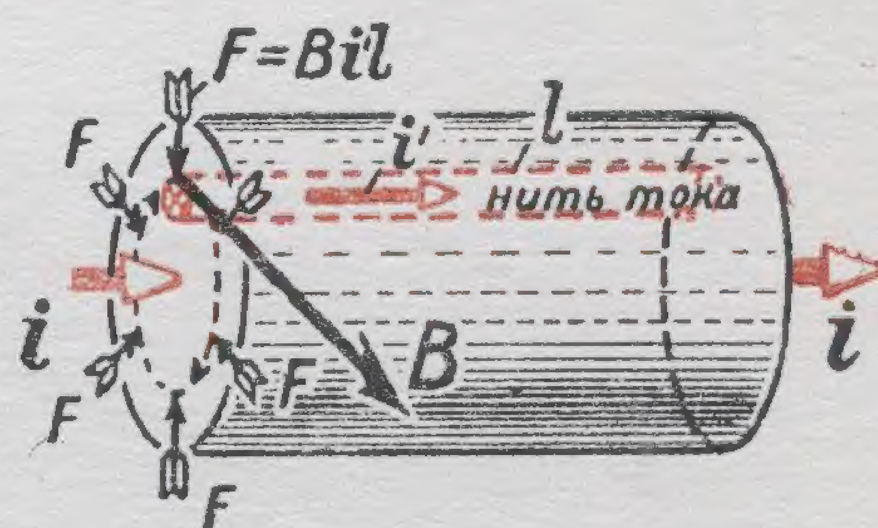
Электромагнитная сила „стремится" увеличить взаимную индуктивность двух контуров с током



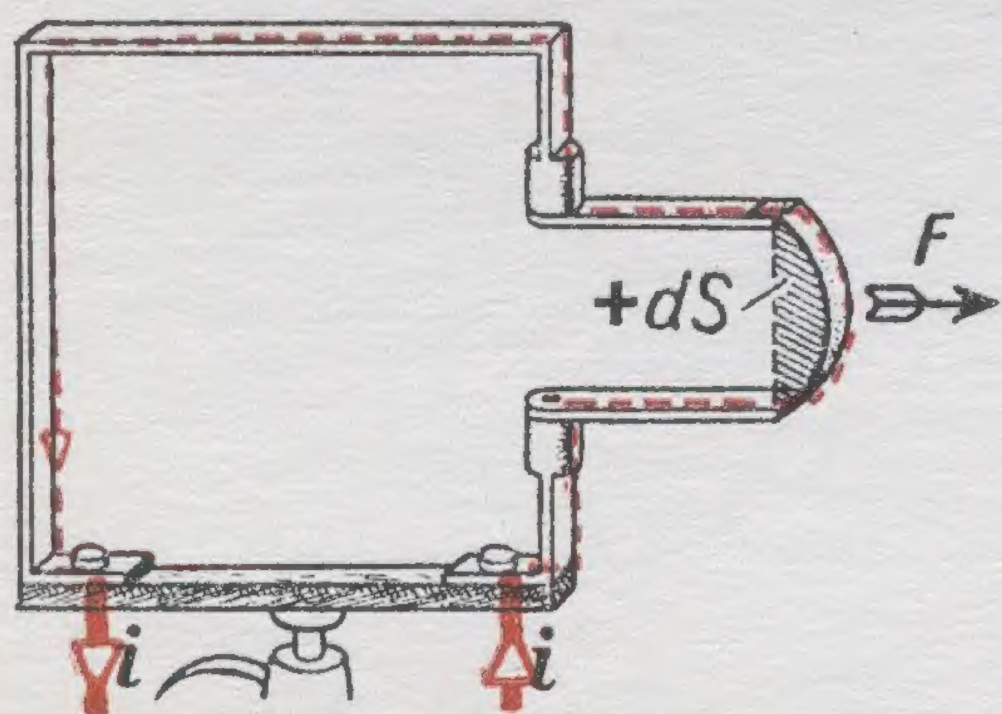
Увеличение площади уединенного контура



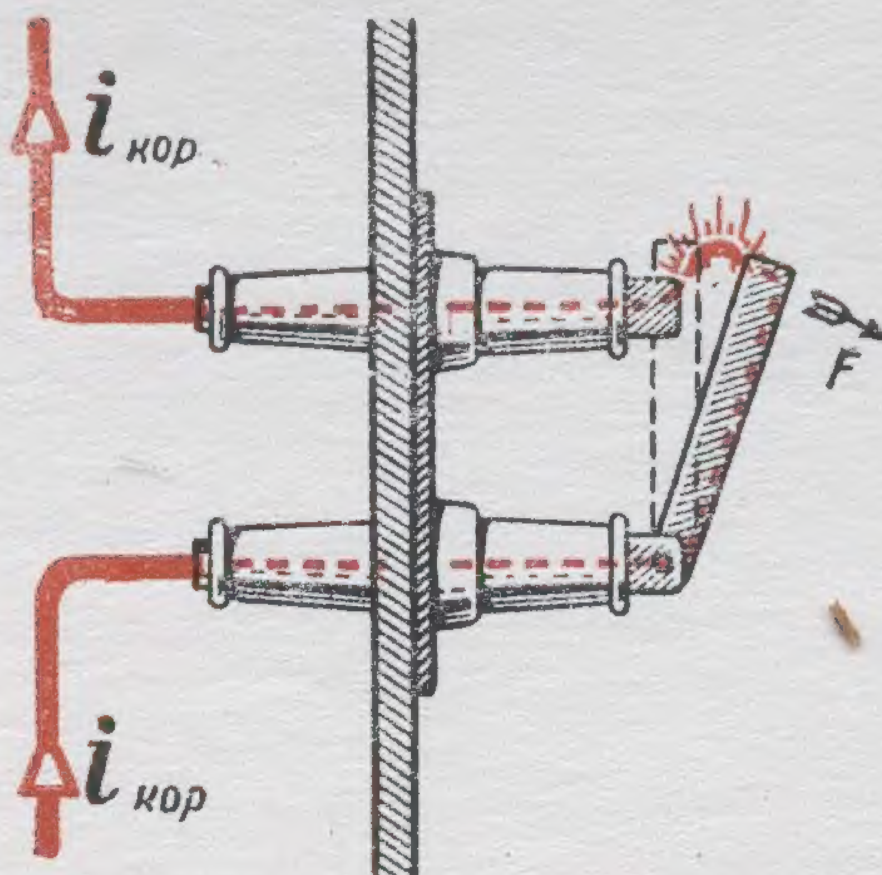
Уменьшение поперечного сечения жидкого проводника



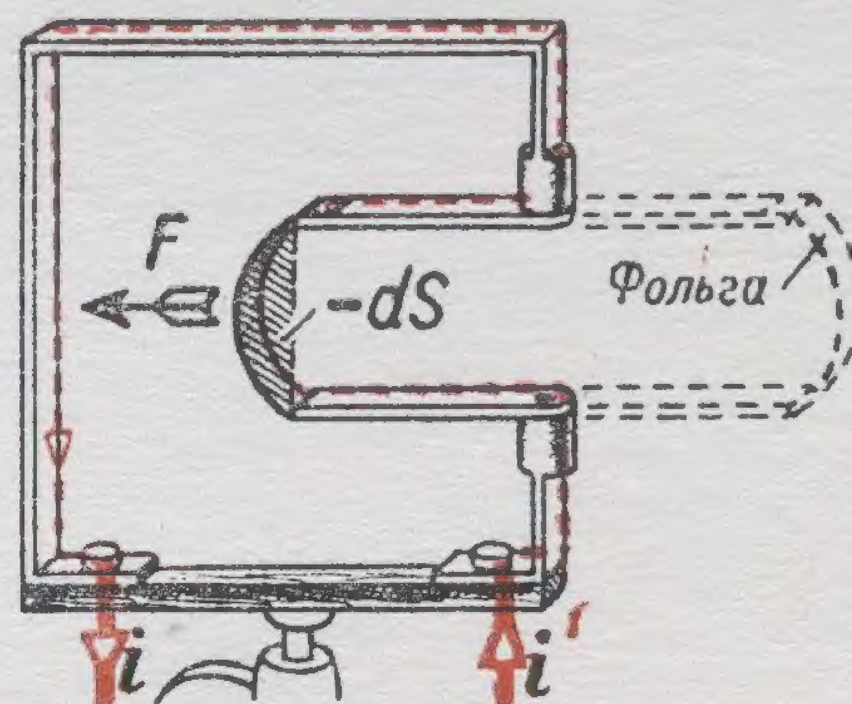
Направление электромагнитных сил в толще проводника



Увеличение периметра и площади контура



Отключение ножа разъединителя электромагнитной силой



Увеличение периметра и уменьшение площади контура

Увеличение индуктивности уединенного контура

$$F_s = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{ds} \quad \frac{дж}{м}$$

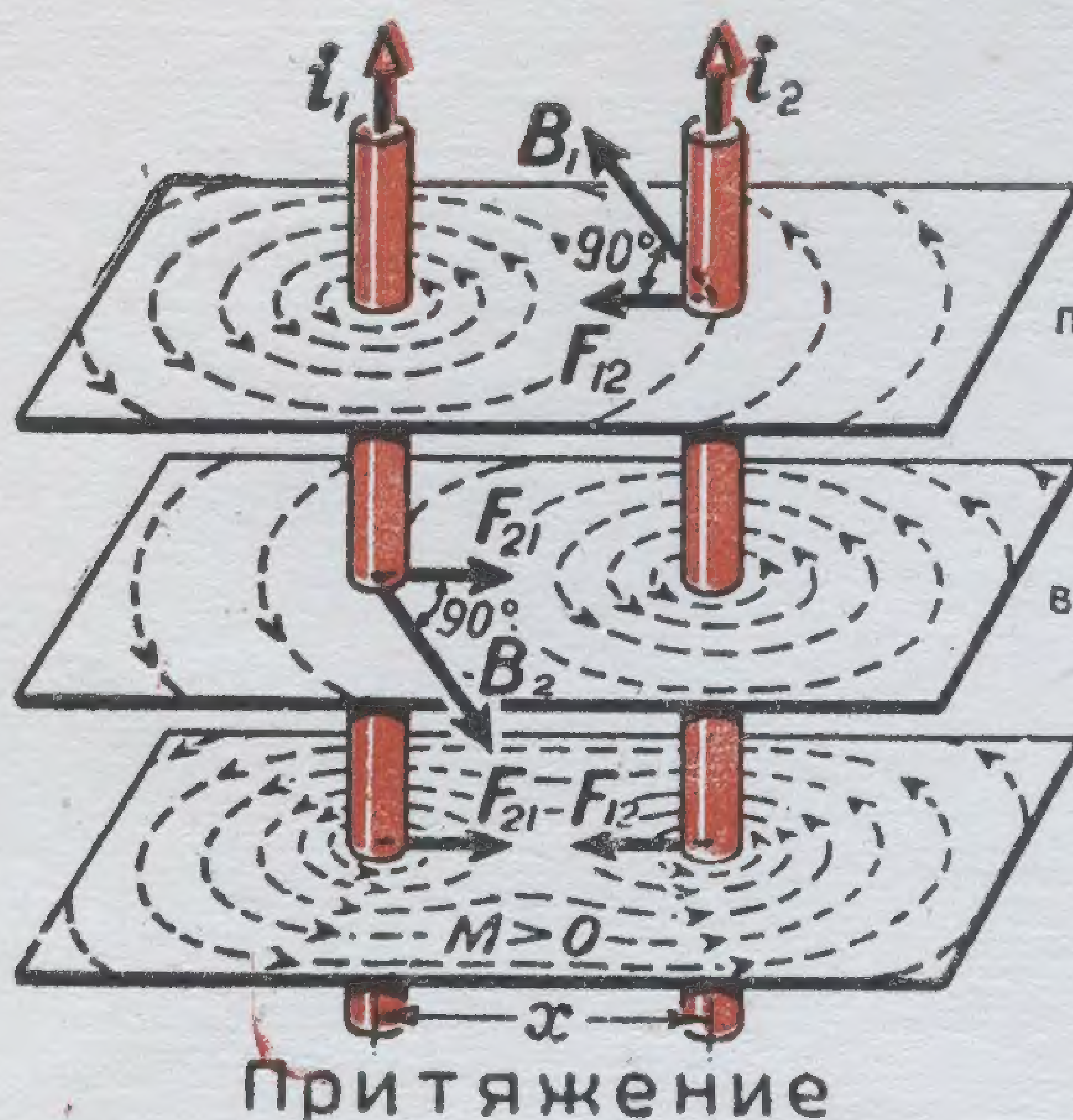
Электромагнитная сила „стремится" увеличить индуктивность уединенного контура с током

$$F_{1s} = \frac{i_1^2}{2} \frac{dL_1}{ds_1} + i_1 i_2 \frac{dM_{12}}{ds_1} + i_1 i_3 \frac{dM_{13}}{ds_1} + \cdots \quad \frac{дж}{м} (н)$$

ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СИЛ

Э.И. Расовский.

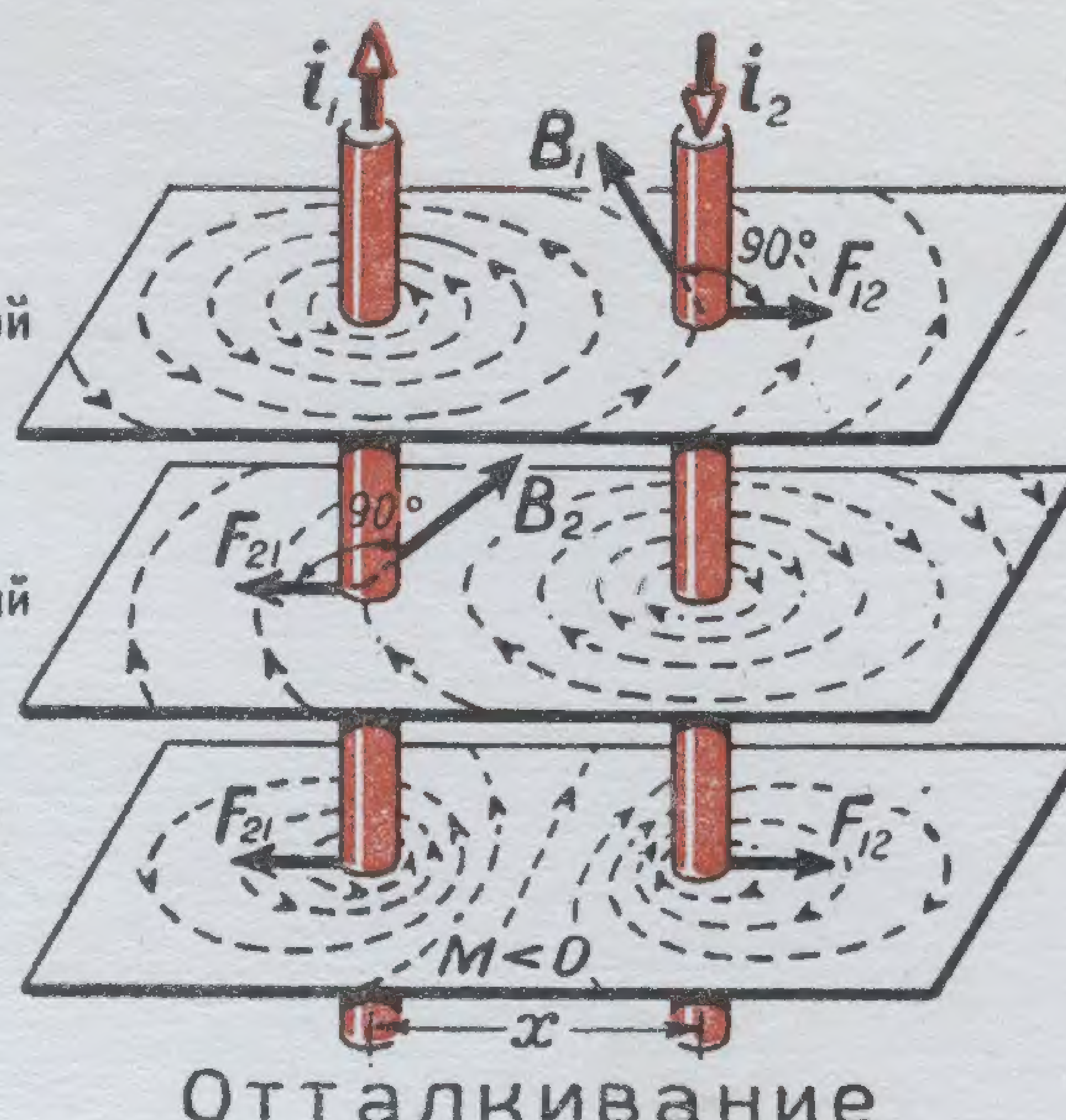
ЗАКОН АМПЕРА



Действие первого тока на второй

Действие второго тока на первый

Взаимодействие токов

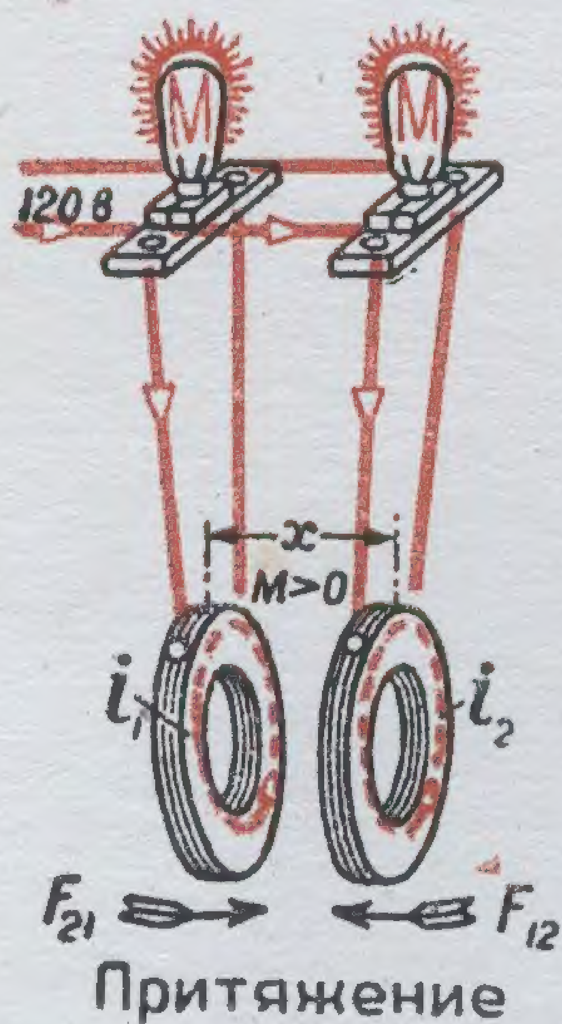


Притяжение — Отталкивание

$$F_x = B_1 i_2 l = B_2 i_1 l = \mu_0 \frac{l}{2\pi x} i_1 i_2 = i_1 i_2 \frac{dM}{dx} \quad \frac{дж}{м}$$

Сила взаимодействия

Взаимодействие параллельных токов



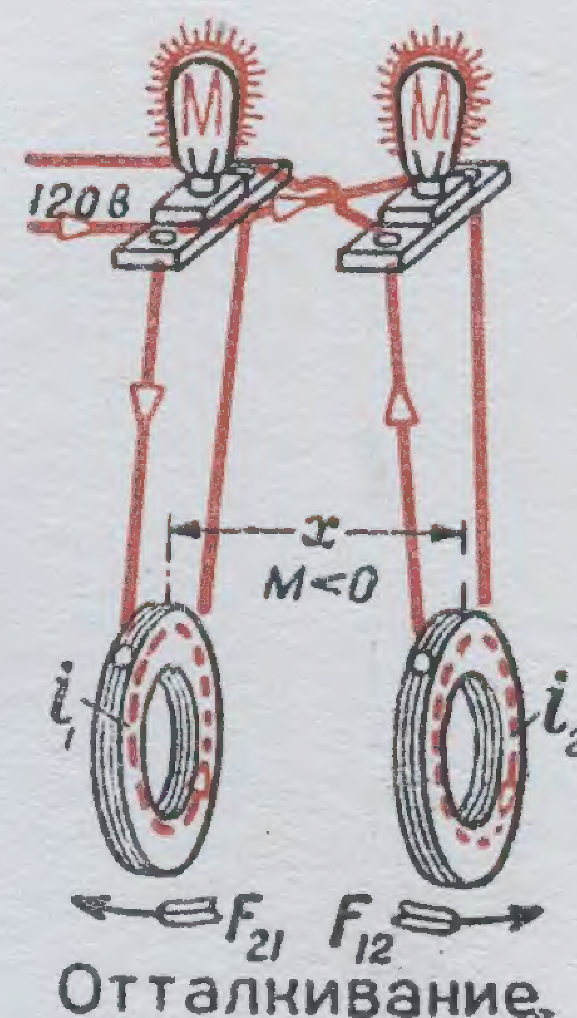
Притяжение



Притяжение.



Отталкивание

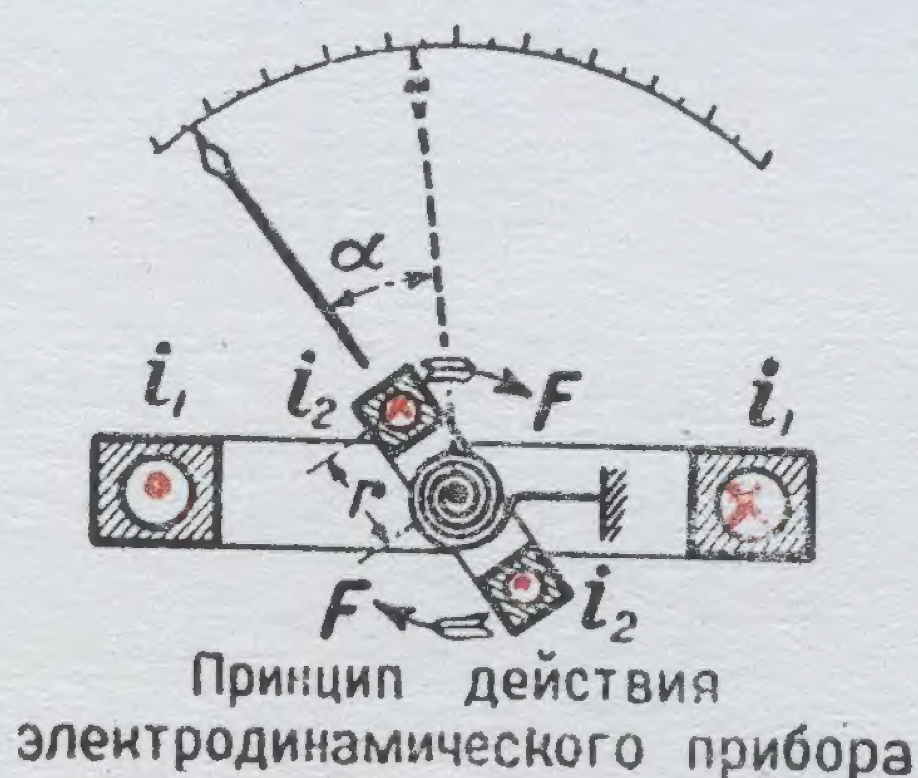


Отталкивание.

$$F_x = i_1 i_2 \frac{dM}{dx} \quad \frac{дж}{м}$$

Сила взаимодействия

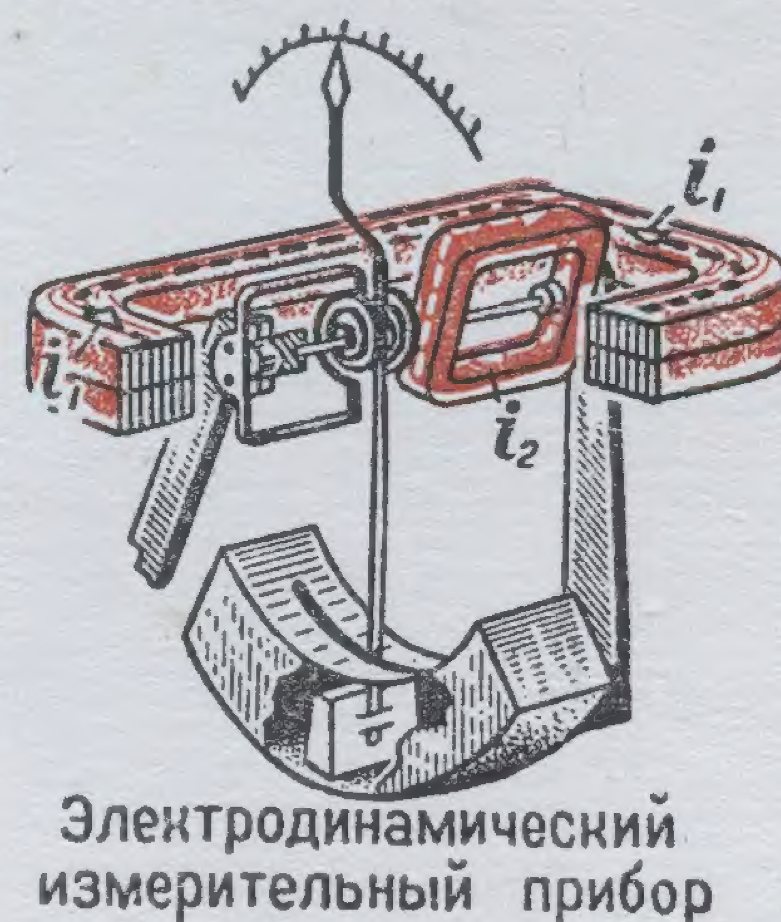
Взаимодействие катушек с током



Принцип действия электродинамического прибора

$$F_r = i_1 i_2 \frac{dM}{d\alpha} \quad дж$$

Вращающий момент прибора



Электродинамический измерительный прибор

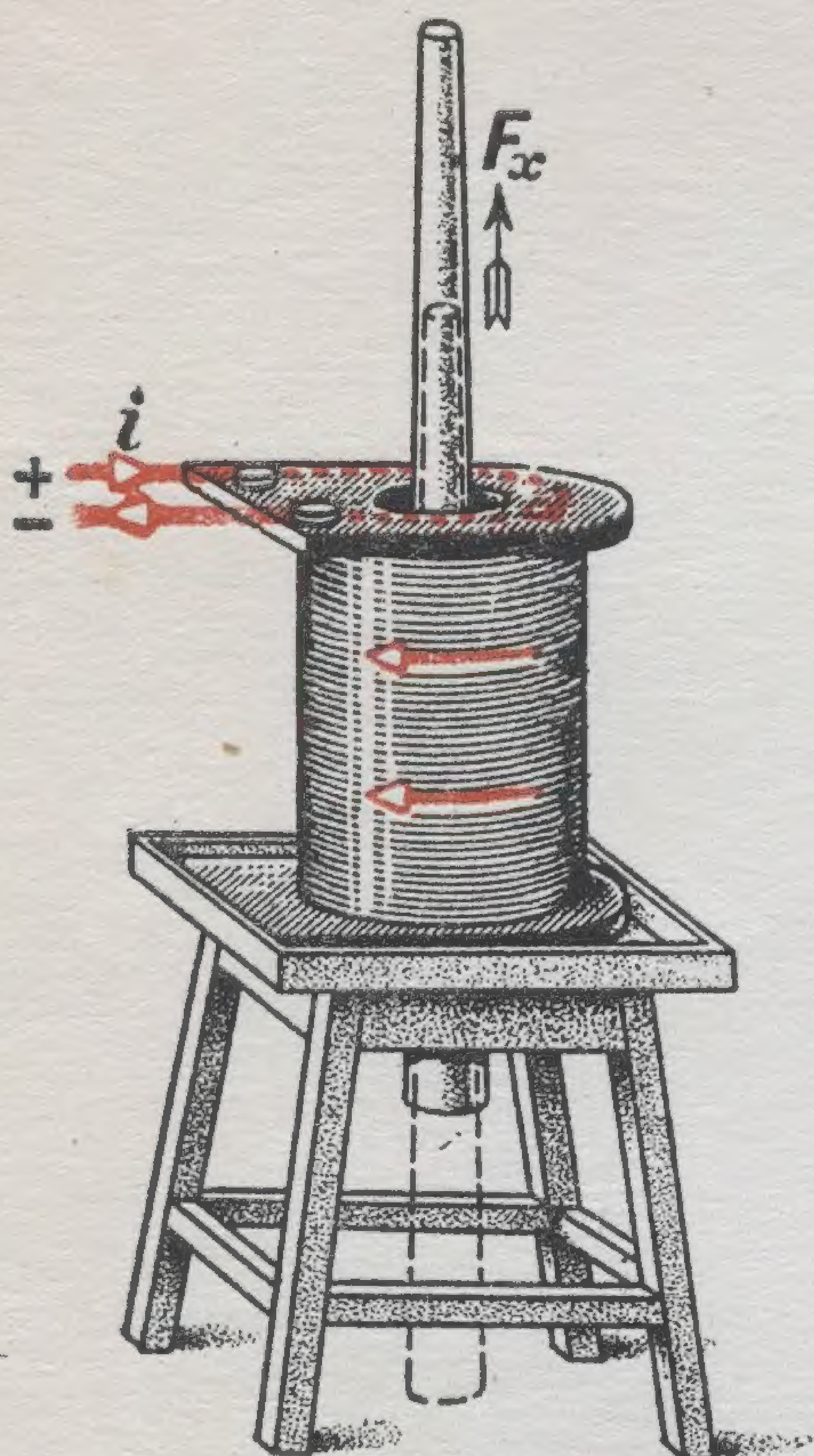
$$F_s = i_1 i_2 \frac{dM}{ds} \quad \frac{дж}{м}$$

Сила взаимодействия двух токов пропорциональна произведению этих токов и зависит от их взаимного расположения

Закон Ампера

Э. И. Расовский.

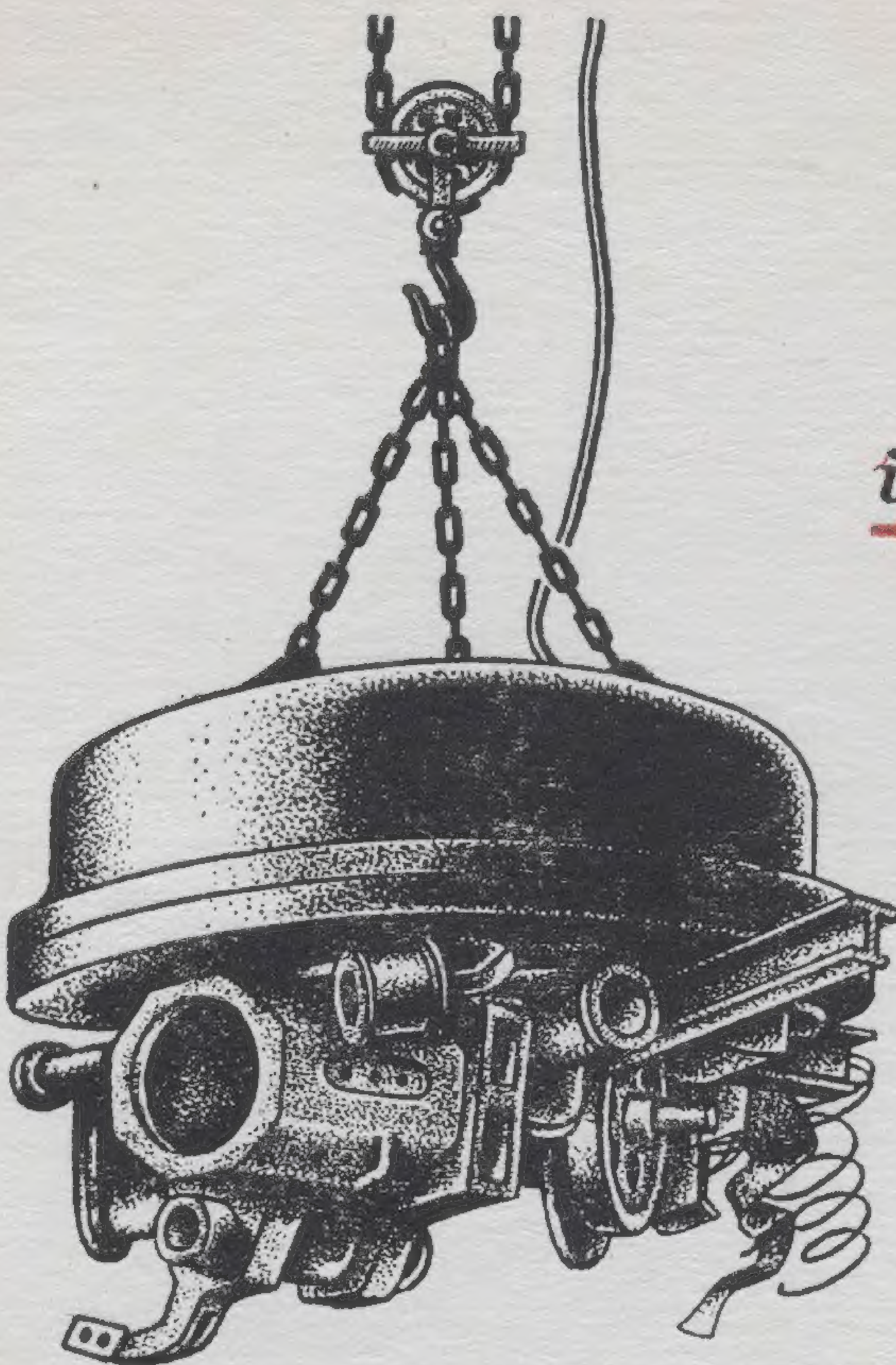
ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ



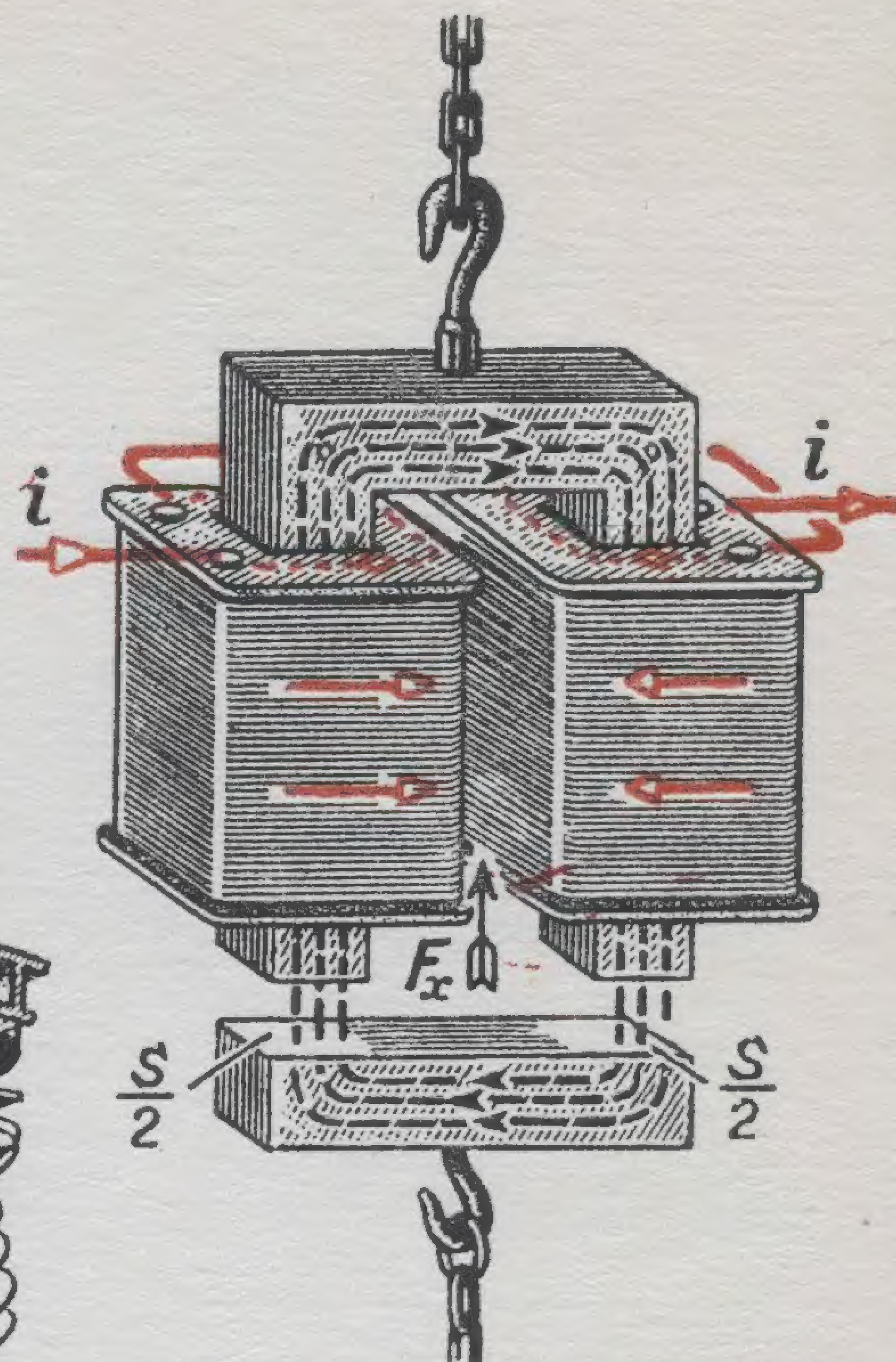
Втяжной электромагнит

$$F_x = \frac{i^2}{2}\frac{dL}{dx} \quad \frac{дж}{м}(н)$$

Сила тяги



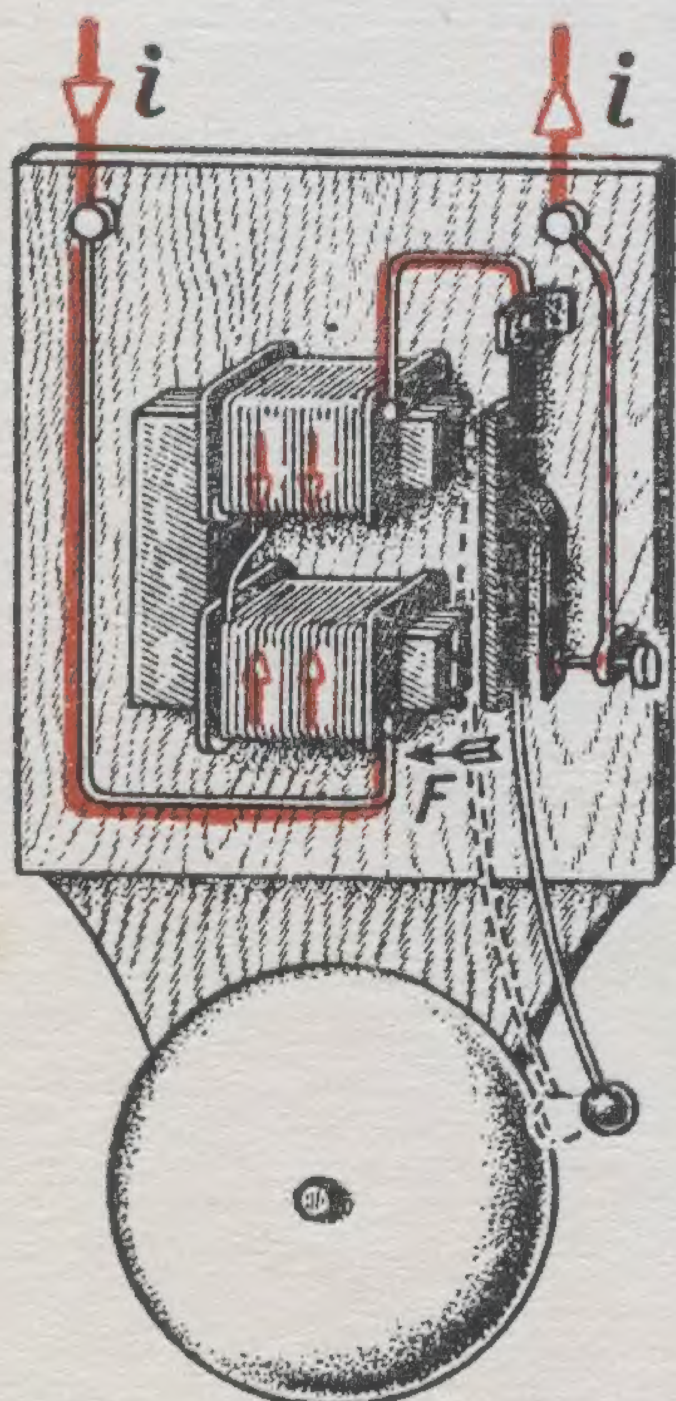
Подъемный электромагнит



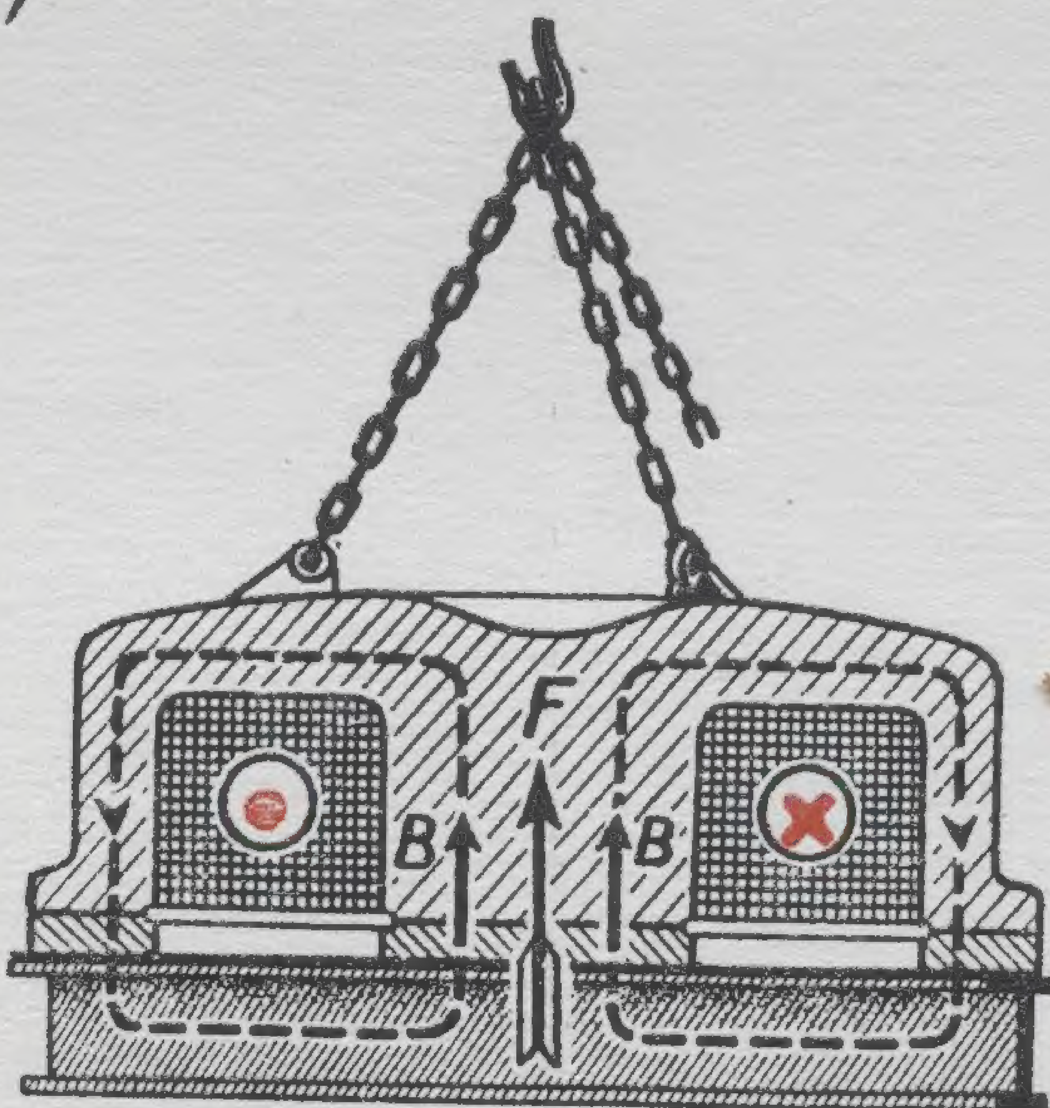
Подковообразный электромагнит

$$F = \frac{i}{2}\frac{dL}{dx} = \frac{BH}{2}S \quad \frac{дж}{м}(н)$$

Подъемная сила



Электрический звонок

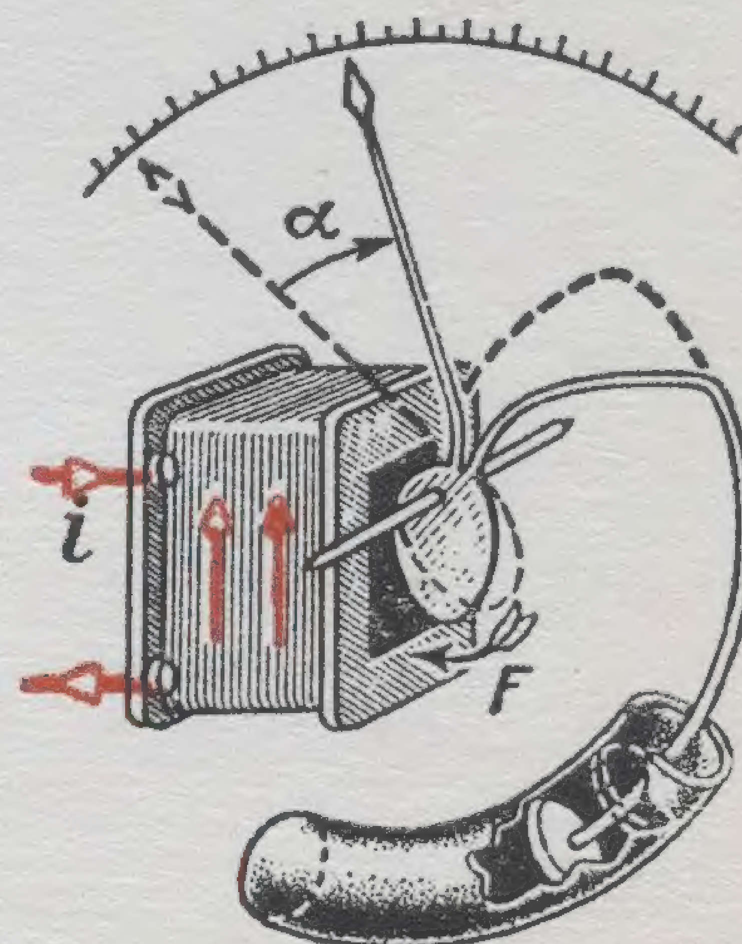


Электромагнит в разрезе

$$F = 4{,}06 \cdot B^2 S \cdot 10^4 \quad кГ$$

$$F = 4{,}06\left(\frac{B_{гс}}{10000}\right)^2 S_{см^2} \quad кГ$$

Подъемная сила электромагнита



Электромагнитный измерительный прибор

$$M_{вр} = \frac{i^2}{2}\frac{dL}{d\alpha} \quad дж$$

Вращающий момент прибора

Э.И.Расовский.

Худ. А. Меньшиков